



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DE UN BRAZO INDUSTRIAL NEUMÁTICO

Autor: Juan Manuel Gayo Martínez

Tutores: Dr. Enrique Soriano Heras
Dr. Higinio Rubio Alonso

Leganés, septiembre de 2013

Título: DISEÑO DE UN BRAZO INDUSTRIAL NEUMÁTICO

Autor: Juan Manuel Gayo Martínez

Directores: Dr. Enrique Soriano Heras

Dr. Higinio Rubio Alonso

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Resumen

El presente proyecto desarrolla una parte importante de la ingeniería básica y de la ingeniería de detalle necesarias para la fabricación de un brazo robótico o robot industrial.

Existen unas particularidades en el diseño que lo diferencian de otros diseños existentes: se utilizarán únicamente actuadores neumáticos lineales, se pretende conseguir un coste de producción reducido para la fabricación de pocas unidades y se realizará un diseño sencillo tanto para su instalación y puesta en marcha como para su mantenimiento.

Para desarrollar el diseño se utilizarán herramientas de software CAD-CAE de última generación. Estas herramientas se utilizarán para el diseño mecánico y modelización, para la simulación dinámica y análisis de mecanismo y para la elaboración y simulación del esquema neumático.

Se va definir un proceso de diseño completo aplicable a este proyecto y se va a marcar el objetivo de cumplir con varias de las tareas recogidas en el mismo, dejando para futuros trabajos el desarrollo del resto de tareas.

En primer lugar se definirán las especificaciones básicas de diseño, se elaborará un diseño preliminar y se procederá a su análisis. Posteriormente se irá afinando el diseño hasta llegar a la versión definitiva.

Utilizando las herramientas CAD-CAE, se realizarán los cálculos y simulaciones necesarios para la aprobación preliminar del diseño y se desarrollan los planos de fabricación del equipo, lo que se ha denominado ingeniería de detalle.

Se recogerán unas nociones básicas sobre el uso de los programas CAD-CAE utilizados, sin embargo, el objetivo es que el proyecto pueda servir de ejemplo práctico de cómo estas herramientas nos ayudan en la fase de diseño de un equipo, no que sirva como manual de uso de estos programas.

Palabras clave: robot industrial, brazo industrial, CAD, CAE, diseño mecánico, mecanismo, instalación neumática, esquema neumático, planos, dibujo técnico.

Abstract

This project develops an important part of the basic engineering and the detail engineering required for the manufacture of a robotic arm or industrial robot.

There are some peculiarities in the design that differentiate it from other existing designs: using only linear pneumatic actuators, to get a reduced production cost for making a few units and to get a simple design for installation and starting and for maintenance.

In order to develop the design last generation CAD-CAE software tools will be used. These tools are used for the mechanical design and modeling, as well as, for the dynamic simulation and mechanism analysis, and for the design and simulation of the pneumatic scheme.

A complete design process applicable to this project will be defined and the target of comply some task will be marked, leaving for future work the development of the rest of the tasks.

First, the basic specifications of the design will be defined. A preliminary design and its analysis will be elaborated. Later, the design will be refined up to the final version.

Using CAD-CAE tools, the calculations and simulations required for the preliminary approval will be performed and the design and manufacturing drawings of the machine will be developed, this is what we will call detail engineering.

Basic notions about the use of the CAD-CAE programs used will be collected, however, the target is that the project can serve as a practical example of how these tools help us in the design phase of a machine, not to serve as a user manual of these programs.

Keywords: industrial robot, robotic arm, CAD, CAE, mechanical design, mechanism, pneumatic installation, pneumatic scheme, drawings, technical drawings.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Objetivos	18
1.3. Fases del desarrollo	19
1.4. Medios empleados	19
1.5. Estructura de la memoria.....	20
2. DATOS DE PARTIDA	23
2.1. Marco histórico.....	23
2.2. Brazos robóticos comerciales	26
2.2.1. ABB IRB 120.....	26
2.2.2. KUKA KR 6-2	27
2.2.3. MOTOMAN MH5	28
2.2.4. FANUC LR MATE.....	28
2.3. Características de la instalación neumática	30
2.3.1. Descripción de componentes	30
3. METODOLOGÍA	33
3.1. Proceso de diseño	34
3.2. Métodos empleados	36
3.2.1. Cajetín	37
3.2.2. Lista de piezas	37
3.2.3. Descripción del material	37
3.3. Software empleado	38
3.3.1. Software de diseño mecánico.....	38
3.3.2. Software de diseño neumático	42
4. DISEÑO MECÁNICO.....	43
4.1. Análisis de mecanismo	45
4.1.1. Clasificación del mecanismo	45
4.1.2. Grados de libertad.....	47
4.1.3. Simplificación del mecanismo	48
4.1.4. Análisis cinemático del mecanismo.....	50
4.2. Síntesis de mecanismo.....	54
4.2.1. Características de funcionamiento	54
4.2.3. Segundo diseño	54
4.2.4. Tercer diseño	58
4.3. Resultados del diseño mecánico	61
4.3.1. Comparación entre los modelos BN02 Y BN03.....	61
4.3.2. Área de trabajo.....	63
4.3.3. Fuerza en los cilindros	64
4.3.4. Reacciones en los apoyos con carga de 5 kg.....	66
5. DISEÑO NEUMÁTICO.....	67
5.1. Esquema neumático	68
5.2. Instalación neumática sobre el equipo.....	70
5.3. Cálculo de los cilindros neumáticos	71
5.4. Resultados del diseño neumático	72
5.4.1 Regulación de las válvulas de control de caudal	73
6. INGENIERÍA DE DETALLE	77
6.1. Lista de planos.....	77

6.1.1. Notas sobre los planos.....	78
6.2. Elementos comerciales	80
6.2.1 Cojinetes sin lubricación.....	80
6.2.2. Cabezas de articulación	81
6.2.3. Cilindros neumáticos.....	81
7. PRESUPUESTO.....	83
7.1. Presupuesto del proyecto.....	83
7.2. Presupuesto del proyecto.....	84
7.3. Diagrama de Gantt.....	86
8. EJEMPLOS DE APLICACIONES	87
8.1. Aplicación transporte	88
8.2. Aplicación pintura	92
8.3. Aplicación soldadura.....	95
9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	97
9.1. Conclusiones	97
9.2 Trabajos futuros.....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	100
Catálogos	100
APENDICE 1. PLANOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE.....	103

Índice de figuras

Figura 1: ejemplos de brazos robóticos industriales según ISO 8378:1994.....	16
Figura 2: Robot diseñado por Leonardo Da Vinci.	23
Figura 3: Sistema de fabricación flexible.....	24
Figura 4: Ultimate PUMA.....	25
Figura 5: Crecimiento del número de robots industriales operativos, Fuente: World Robotics, 2008.....	25
Figura 6: Principales fabricantes de robots industriales del mundo.....	26
Figura 7: Robot ABB IRB120.....	26
Figura 8: Alcance robot ABB IRB120.....	27
Figura 9: Robot KUKA KR 6-2.....	27
Figura 10: Alcance robot KUKA KR 6-2.....	27
Figura 11: Robot Motoman MH5.....	28
Figura 12: Alcance robot Motoman MH5.....	28
Figura 13: Robot Fanuc LR Mate.....	29
Figura 14: Alcance robot Fanuc LR Mate.....	29
Figura 15: Instalación básica de aire comprimido.....	30
Figura 16: Sistema de generación de aire comprimido.....	31
Figura 17: Cilindro de doble efecto.....	31
Figura 18: Regulador de caudal unidireccional.....	32
Figura 19: Silenciador.....	32
Figura 20: Válvula direccional 5/3.....	32
Figura 21: Diagrama de flujo completo del proceso de diseño.....	34
Figura 22: Diagrama de flujo reducido del proceso de diseño realizado.....	35
Figura 23: Autodesk Inventor 2012.....	38
Figura 24: Ejemplo de Modelado 3d.....	39
Figura 25: Ejemplo de Modelado 3d modificado.....	40
Figura 26: Acceso al entorno de simulación dinámica (Autodesk Inventor).....	41
Figura 27: Entorno de simulación dinámica (Autodesk Inventor).....	41
Figura 28: Software de simulación Automation Studio.....	42
Figura 29: Par de rotación (o revolución).....	44
Figura 30: Par de traslación (o prismático).....	44
Figura 31: Par helicoidal o de tornillo.....	44
Figura 32: Vista en isométrica del diseño preliminar.....	45
Figura 33: Mecanismo como un mecanismo plano y un eje de rotación.....	45
Figura 34: Alzado: Mecanismo plano; Planta: Movimiento de giro de la base del mecanismo.....	46
Figura 35: Pares cinemáticos del mecanismo plano.....	47
Figura 36: Eslabones del mecanismo plano.....	47
Figura 37: Eslabones del mecanismo considerando sólo el movimiento del cilindro 1.....	49
Figura 38: Eslabones del mecanismo considerando sólo el movimiento del cilindro 2.....	49
Figura 39: Eslabones del mecanismo considerando sólo el movimiento del cilindro 3.....	50
Figura 40: Trayectoria límite del mecanismo.....	51
Figura 41: Análisis cinemático considerando solamente el cilindro 1.....	52
Figura 42: Análisis cinemático considerando solamente el cilindro 2.....	53
Figura 43: Evolución del diseño del eslabón 1.....	55
Figura 44: Diseño BN02.....	56
Figura 45: Trayectoria análisis BN02.....	56

Figura 46: Trayectoria BN02	57
Figura 47: Fuerza en los cilindros BN02.....	57
Figura 48: Fuerza en los cilindros por zonas de la trayectoria	58
Figura 49: Modificaciones diseño BN02.....	59
Figura 50: Modificaciones diseño BN02.....	59
Figura 51: Modificaciones diseño BN02.....	60
Figura 52: Modelo BN03	60
Figura 53: Sección transversal Modelo BN03	61
Figura 54: Comparación trayectoria BN02 y BN03.....	61
Figura 55: Comparación fuerza cilindro 1 BN02 y BN03	62
Figura 56: Comparación fuerza cilindro 2 BN02 y BN03	62
Figura 57: Área de trabajo según la carga.....	63
Figura 58: Área de trabajo BN03	63
Figura 59: Fuerza en los cilindros BN03, carga 5 kg	64
Figura 60: Fuerza en los cilindros BN03, carga 4 kg.....	64
Figura 61: Fuerza en los cilindros BN03, carga 3 kg.....	65
Figura 62: Fuerza en los cilindros BN03, carga 2 kg.....	65
Figura 63: Reacciones en los apoyos	66
Figura 64: Numeración de los apoyos.....	66
Figura 65: Esquema neumático	68
Figura 66: Esquema neumático con cilindros en fase de subida.....	69
Figura 67: Esquema neumático con cilindros en fase de bajada.....	70
Figura 68: Esquema para el estudio de las vibraciones neumáticas.....	73
Figura 69: Oscilación neumática 1	74
Figura 70: Tiempo de llenado 1	74
Figura 71: Oscilación neumática 2	75
Figura 72: Tiempo de llenado 2	75
Figura 73: Oscilación neumática 3	76
Figura 74: Tiempo de llenado 3	76
Figura 75: Entalladura DIN 509.....	78
Figura 76: Salida de rosca	79
Figura 77: Micro sección de cojinete	80
Figura 78: cabeza de articulación.....	81
Figura 79: Cilindro neumático	81
Figura 80: Diagrama de Gantt realizado	86
Figura 81: Aplicación transporte.....	88
Figura 82: Fuerzas en los cilindros, aplicación transporte	89
Figura 83: Posición de los cilindros en la aplicación de transporte	89
Figura 84: Velocidad de los cilindros en la aplicación de transporte.....	90
Figura 85: Velocidad de giro de los eslabones en la aplicación de transporte.....	90
Figura 86: Potencia en los cilindros en la aplicación de transporte	91
Figura 87: Energía total consumida en los cilindros en la aplicación de transporte	91
Figura 88: Características del movimiento de la pinza en la aplicación de transporte	92
Figura 89: Aplicación pintura.....	92
Figura 90: Posición de los cilindros en la aplicación de pintura	93
Figura 91: Posición de la pinza en la aplicación de pintura	93
Figura 92: Velocidad de la pinza en la aplicación de pintura	94
Figura 93: Aceleración de la pinza en la aplicación de pintura.....	94
Figura 94: Aplicación soldadura	95

Índice de tablas

Tabla 1: Tipos de robots industriales según ISO8373.....	17
Tabla 2: Lista de archivos CAD	36
Tabla 3: Cajetín	37
Tabla 4: Lista de piezas	37
Tabla 5: Tabla de material.....	37
Tabla 6: Condiciones de funcionamiento	54
Tabla 7: Norma ISO 8573-1	71
Tabla 8: Cálculo inicial de los cilindros neumáticos.....	72
Tabla 9: Cálculo final de los cilindros neumáticos	72
Tabla 10: Lista de planos.....	78
Tabla 11: Presupuesto del proyecto.....	84
Tabla 12: Presupuesto de fabricación.....	85

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

En el presente proyecto se desarrolla parte de la ingeniería básica y de detalle necesarias para la fabricación de un brazo industrial neumático. Un brazo industrial es un tipo de brazo mecánico, normalmente programable, con funciones parecidas a las un brazo humano. Este puede ser parte de un mecanismo más complejo o constituir un mecanismo completo por sí sólo.

Las partes de estos manipuladores o brazos están interconectadas a través de uniones o articulaciones que pueden permitir, tanto un movimiento rotacional, como un movimiento translacional o desplazamiento lineal.

El estándar ISO 8373:1994 “*Robots industriales manipuladores – Vocabulario*”, define un robot industrial como un manipulador programable en tres o más ejes multipropósito, controlado automáticamente y reprogramable. Dentro de esta definición podemos encontrar distintos tipos de robots industriales, ver Tabla 1. Dentro de los distintos tipos nuestro diseño será del tipo robot articulado.

El robot industrial de tipo articulado, también se denomina generalmente brazo robótico industrial, simplemente, brazo robótico, o bien brazo industrial que es como nos referimos al mismo en este proyecto. Es el tipo de robot más extendido para aplicaciones industriales por lo que existen muchos diseños de brazos robóticos en el mercado, sin embargo en nuestro diseño partimos de unas características particulares que lo diferencian del resto.

1. Utilización únicamente de actuadores neumáticos lineales. El diseño se realizará con actuadores del tipo cilindro neumático, con esto pretendemos realizar un diseño de coste reducido, ya que este tipo de actuadores son muy simples, su uso está muy extendido y son económicos. Debido a su simplicidad tienen muy pocas averías y su reparación es muy sencilla y económica. Gracias a su uso extendido es sencillo encontrar personal capacitado para trabajar con este tipo de dispositivos. En el futuro estos actuadores podrán ser sustituidos por otros de tipo músculo neumático, realizando pocas variaciones en el diseño, consideramos que en futuro se tiende a utilizar cada vez más este tipo de actuadores, según el fabricante FESTO, las ventajas de este tipo de actuadores son: fuerza inicial hasta 10 veces superior a la de un cilindro convencional del mismo diámetro; gran dinamismo, incluso con grandes cargas; sin partes mecánicas móviles en sentidos opuestos; sin tirones, también al ejecutar movimientos muy lentos; accionamiento sencillo mediante presión, sin detector de recorrido; separación entre el fluido de funcionamiento y la atmósfera; ideal para aplicaciones expuestas a polvo y suciedad y estructura robusta, sin fugas.
2. Coste de fabricación reducido para la producción de pequeñas cantidades, incluso para una unidad. Tratamos de evitar la utilización de piezas complicadas fabricadas a partir de fundición o que requieran alto coste de utillaje, cómo es el caso de piezas fabricadas por embutición. Estas piezas encarecerían la fabricación para series pequeñas, el diseño está pensado para ser producido para aplicaciones especiales, prácticamente a medida y para la realización de trabajos relativamente sencillos.
3. Sencillez en el diseño, tratamos de realizar un diseño sencillo y económico, sin complejas válvulas de control electrónicas, con esto se pretende reducir la posibilidad de que el sistema sufra averías y reducir su coste tanto de producción como de mantenimiento, pretendemos reducir al mínimo el LLC, coste de ciclo de vida del producto.



Figura 1: ejemplos de brazos robóticos industriales según ISO 8378:1994

Estas características difieren de los diseños existentes en la industria, ya que éstos cuentan con actuadores de tipo rotativos, están pensados para fabricación en series relativamente grandes y cuentan con diseños neumáticos complejos que a su vez están controlados por una electrónica compleja.

Todas estas características particulares, hacen necesaria la realización de un nuevo diseño diferente a los existentes en el mercado.

Actualmente para realizar esta tarea profesionalmente de forma competitiva es necesario utilizar las herramientas informáticas CAD-CAE disponibles en el mercado. En el presente proyecto tratamos de aprovechar las ventajas que supone utilizar este tipo de software.

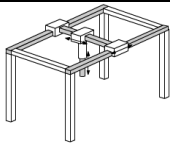
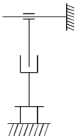
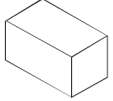

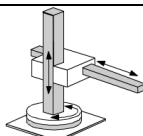
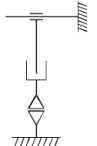


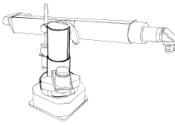
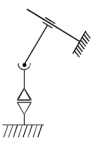


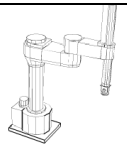
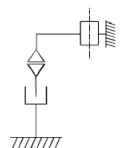
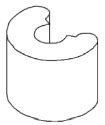


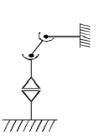


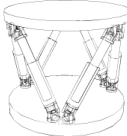
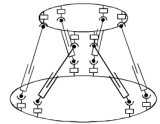


Robot	Ejes		Ejemplo
Principio	Esquema cinemático	Espacio de trabajo	Foto
 Robot cartesiano			
 Robot cilíndrico			
 Robot esférico			
 Robot SCARA			
 Robot articulado			
 Robot paralelo			

Tabla 1: Tipos de robots industriales según ISO8373

La realización de un diseño de estas características de modo profesional requiere un número de horas de diseño muy superior a las que se corresponden con los créditos de un proyecto fin de carrera, por lo que será necesario dejar fuera del ámbito del presente proyecto algunas partes importantes del diseño (ver Apartado 3.1).

1.2. Objetivos

El primer objetivo fundamental del proyecto es el de realizar el diseño de un brazo industrial, que debe ser sencillo, funcional y económico, utilizando únicamente actuadores neumáticos lineales. En base a este objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

1. Determinación del proceso de diseño y delimitación de las tareas a realizar dentro del mismo
2. Determinación de los requisitos de funcionamiento en base a los cuales se aprobará el diseño.
3. Diseño mecánico según los principios de la Teoría de Máquinas y Mecanismos: estudio de las trayectorias, velocidades, aceleraciones y fuerzas a los que se encuentran sometidos los elementos de la máquina en su funcionamiento.
4. Diseño neumático del circuito y de los componentes necesarios para su implementación.
5. Elaboración de planos y documentación necesaria para la fabricación.

El segundo objetivo fundamental es el de utilizar las ventajas que supone la utilización de las herramientas de software CAD-CAE para realizar este diseño así como para realizar las simulaciones y cálculos necesarios. Utilizar estas herramientas es una ventaja fundamental en nuestro diseño de brazo industrial ya que nos permite adaptar el diseño a una aplicación concreta de forma económica. En base a este objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

1. Utilización de un software de diseño CAD-CAE que nos permita desarrollar el proyecto.
2. Realización de una simulación dinámica que nos permita comprobar si el diseño se ajusta a los parámetros definidos, para dar la aprobación al mismo.
3. Realización de una simulación neumática que nos permita ajustar los parámetros neumáticos del diseño a los requerimientos de funcionamiento determinados.
4. Realización de varias simulaciones para determinar si la utilización de este tipo de software nos permite obtener ventajas en el diseño del equipo y comprobar si el diseño cumple satisfactoriamente con las necesidades de las aplicaciones para las que ha sido diseñado

1.3. Fases del desarrollo

En primer lugar se ha definido un diagrama de procesos con las fases que entendemos debe tener un diseño de estas características, debido a la imposibilidad de desarrollar todas las fases del proyecto, que según exponemos en el Apartado 3.1 requieren unos recursos superiores a los disponibles para realizar este proyecto, nos hemos centrado sólo en algunos puntos del mismo, dejando para trabajos futuros (Apartado 9.2) la realización del resto.

En primer lugar se han recogido los datos de partida, a partir de las características de las instalaciones neumáticas disponibles en la industria, que nos marcarán el rango de presión de trabajo y la potencia máxima disponible. La presión máxima será la presión para la que están diseñadas las instalaciones (Apartado 2.3).

También se han estudiado diseños de brazos robóticos con aplicaciones equivalentes disponibles en el mercado, de esta forma se han podido definir las especificaciones técnicas básicas de nuestro sistema, en base a las características técnicas de los diseños de los principales fabricantes que disponen de equipos que ya han sido utilizados en este tipo de aplicaciones.

A continuación se ha realizado un análisis de mecanismo del mecanismo de partida, que denominamos brazo neumático BN01 o diseño preliminar. Posteriormente se ha intentado simplificar el diseño y reducir el número de piezas, de esta forma se ha realizado un segundo diseño denominado brazo neumático BN02. Se ha realizado una simulación de este diseño pero los resultados obtenidos no se han aceptado como válidos según las especificaciones definidas en los Apartados 2.2 y Apartado 4.2.1.

Se ha realizado un tercer diseño, denominado brazo neumático BN03, en este caso las mejoras introducidas han sido satisfactorias y los resultados de la simulación se han aprobado.

Una vez finalizada la fase de diseño básico, o ingeniería básica, se ha procedido a la fase de ingeniería de detalle, en esta fase se han elaborado los planos necesarios para la fabricación y montaje de las piezas y se han seleccionado los componentes comerciales que se instalarán en el equipo.

Se han desarrollado varias simulaciones de distintas aplicaciones comprobando que el diseño es apto para la realización de los trabajos para los que ha sido diseñado.

Finalmente se ha construido un prototipo que nos permitirá verificar que los resultados obtenidos de forma teórica y numérica se corresponden con los datos medidos en el prototipo.

1.4. Medios empleados

Para la realización del proyecto se han utilizado los siguientes medios:

- Catálogos y especificaciones técnicas de fabricantes
- Programa de diseño CAD-CAE, Autodesk Inventor Professional 2012 (versión para estudiantes)
- Programa de simulación de circuitos neumáticos, hidráulicos y eléctricos, Automation Studio 5.2.

- Programa Microsoft Excel para el tratamiento de los datos, la realización de cálculos y la elaboración de gráficas. Programa Microsoft Word para la elaboración del documento de la memoria.

1.5. Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo.

1. En el primer capítulo se define el proyecto y se exponen los motivos que hacen necesaria su realización. A pesar de que existen diseños similares el nuestro cuenta con las características específicas expuestas que hacen necesario su desarrollo. Además queremos desarrollar el proyecto como un ejemplo práctico de las mejoras que supone la utilización de programas de diseño y simulación CAD-CAE en la fase de diseño.
2. En el segundo capítulo se define el proceso de diseño y se desarrolla la metodología que se ha seguido para desarrollar el proyecto. Dentro de la metodología se incluyen los formatos y tablas que se han definido y que posteriormente se utilizan de en el resto del proyecto, también se incluyen las nociones básicas que se han tenido que adquirir con los programas de diseño utilizados, los criterios que se han utilizado para tratar los datos y los archivos, la normalización de los planos elaborados y un presupuesto del coste que supone la realización de este trabajo.
3. En el tercer capítulo se ha desarrollado un estudio de los datos de partida necesarios para poder realizar el trabajo, se han obtenido datos de las instalaciones neumáticas a las que va a estar conectado el equipo. Se ha realizado una introducción histórica y un estudio de los diseños similares disponibles en el mercado.
4. En el cuarto capítulo se describe cómo se ha desarrollado el diseño mecánico preliminar del equipo y se elaboran las simulaciones de funcionamiento. Se trata tanto de un diseño de análisis de mecanismo como de un diseño de síntesis de mecanismo. Como se puede ver en dicho capítulo han sido necesarios posteriormente dos diseños para llegar al definitivo, el primer diseño trata de mejorar la fabricación y el funcionamiento sin afectar a la geometría de la máquina, en el segundo diseño se modifican las dimensiones del equipo para intentar conseguir un mecanismo capaz de realizar los esfuerzos que se le exigen.
5. En el quinto capítulo se desarrolla el diseño neumático, se elabora el esquema neumático y se realizan las simulaciones necesarias para ajustar dicho diseño a las características de funcionamiento que queremos obtener. Se ha detectado que se producen vibraciones en los cilindros neumáticos cuando se produce una parada del mismo, se han tenido que realizar varias simulaciones con distintos valores de caudal de aire para conseguir ajustar estas vibraciones a unos valores admisibles. Para ajustar el caudal de aire se utilizan obstrucciones en el paso de aire que consisten en orificios de un diámetro determinado.
6. En el sexto capítulo se desarrolla la ingeniería de detalle del equipo, se han realizado los planos de fabricación y de montaje del equipo con un detalle que permite su fabricación, incluyendo todas las notas necesarias para hacer posible

la construcción del equipo. También se han seleccionado los componentes comerciales necesarios para su fabricación de la máquina y se exponen los criterios técnicos que se han seguido para ello.

7. En el séptimo capítulo se exponen las conclusiones a las que se ha llegado en la elaboración del proyecto. Se ha dado un enfoque “clase y clase” relacionando las conclusiones con los objetivos exponiendo si se ha conseguido alcanzar los objetivos marcados. Se ha añadido un apartado de trabajos futuros donde se recogen trabajos que se han quedado sin hacer por falta de recursos y se proponen otros trabajos relacionados con el proyecto que se podrían realizar.

Capítulo 2

Datos de partida

2.1. Marco histórico

Los primeros conceptos de robots de los que tenemos constancia histórica se remontan a la Antigua Grecia. En el año 322 antes de Cristo el filósofo Aristóteles escribió: “Si cada herramienta, cuando se le solicitare, o incluso por propia iniciativa, pudiera realizar el trabajo que le corresponde, no serían necesarios los aprendices para los maestros, ni los esclavos para los señores.”

En 1495 Leonardo da Vinci diseñó un dispositivo mecánico inspirado en un caballero con armadura cuyo mecanismo interno estaba diseñado para mover el dispositivo siendo operado por una persona escondida en el interior de la estructura.

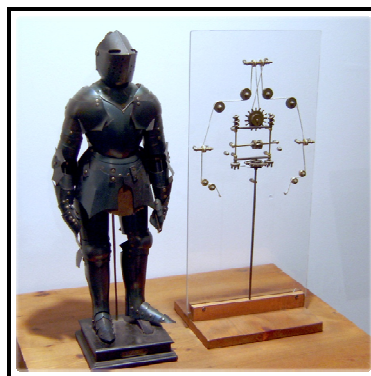


Figura 2: Robot diseñado por Leonardo Da Vinci.

El término robot fue introducido en 1921 por el escritor checo Karel Capek y procede del término checo 'robota', que significa trabajo forzado y 'robotnik', esclavo o siervo.

Isaac Asimov, el escritor de ciencia ficción y divulgador científico, fue quién popularizó el término robótica (robotics, en inglés) en 1942, para describir el estudio de los robots y referirse al alto potencial que tendría la Industria del Robot.

Denavit y Hartenberg en 1955, aplicaron los conceptos matemáticos de Transformaciones Homogéneas para modelar la cinemática de los manipuladores robóticos.

Las ventajas de los sistemas de fabricación flexibles (FMS) en la década de 1960 establecieron la robótica como una disciplina científica. Los objetivos de los sistemas FMS eran reducir los costes, aumentar el mix de productos y acercar el factor de utilización al factor de disponibilidad de los recursos.

Un sistema FMS típico incluye, robots industriales, sistemas de almacenaje y transporte de material automáticos y un sistema de software complejo que permita modelar, operar y monitorizar la Fábrica. Los robots industriales son un factor crítico en esta estrategia que trata de minimizar el factor de errores humanos y permite adaptarse rápidamente a los cambios en la cadena de montaje sin necesidad de invertir en equipamiento costoso y permitiendo la producción económica de lotes personalizados.



Figura 3: Sistema de fabricación flexible

Resumen de la evolución del mercado de brazos robóticos industriales en el siglo XX

Al comienzo de la década de 1960 estados Unidos no tenía competencia en la investigación y producción de robots. El primer robot industrial Unimate, fue fabricado en Estados Unidos en 1961 por Unimation, basado en su propia patente registrada en 1954. El Unimate, que fue diseñado para transporte de material, utilizaba actuadores hidráulicos.

El primer brazo industrial, denominado Stanford Arm y diseñado por Victor Scheinman, era un brazo de seis ejes diseñado para seguir rutas arbitrarias en el espacio tridimensional. Este diseño ampliaba la aplicación de los robots a tareas más sofisticadas como la soldadura. Unimation con el apoyo de General Motors adquirió el desarrollo del brazo de Stanford dando lugar al modelo PUMA (programmable universal machine for assembly)



Figura 4: Ultimate PUMA

La industria robótica japonesa se considera que se inicia en 1967 cuando la Tokio Machinery Trading Company empezó a importar el robot Versatran de AMF Corporation. En 1968 Kawasaki Heavy Industries llegó a un acuerdo con Unimation para producir robots en Japón. A finales de la década de 1970 se produjo un auge en el interés mundial por los robots industriales y un gran número uniones de compañías de Estados Unidos y Japón para producirlos, especialmente debido a que en Japón no estaban protegidos los diseños por las patentes.

Durante la década de 1980 los robots industriales se fabricaron en serie a gran escala. Desde 1978 a 1990 la producción de robots industriales en Japón creció en un factor de 25, durante éste periodo la Japan Industrial Robot Association (JIRA) tuvo que corregir al alza varias veces sus predicciones.

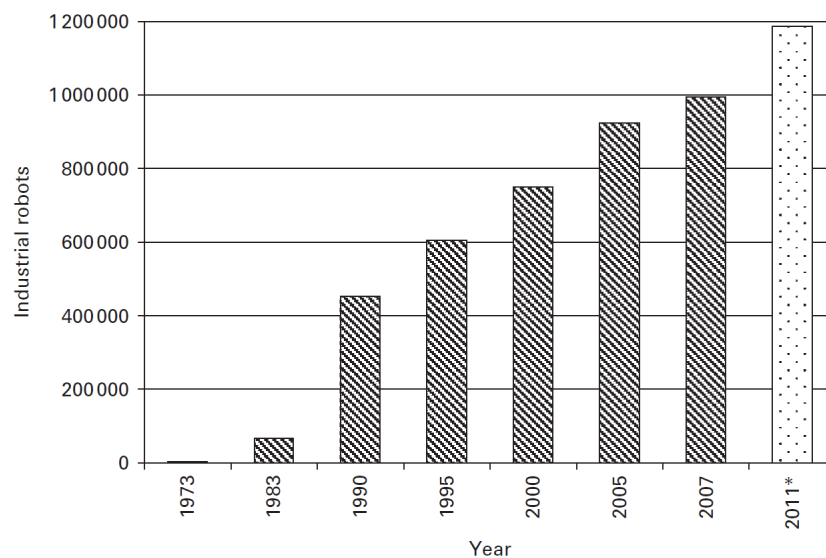


Figura 5: Crecimiento del número de robots industriales operativos, Fuente: World Robotics, 2008

Según la JIRA (actualmente JARA) el éxito de los robots industriales se debe a tres factores:

1. Son programables y por tanto flexibles y versátiles,
2. Superan las capacidades de los humanos durante largos periodos de tiempo y en entornos incómodos o peligrosos.
3. Siguen con fidelidad y precisión las instrucciones programadas.

La industria de robot japonesa con sus grandes recursos financieros ha prevalecido en la competición global frente a los fabricantes de Estados Unidos y Europa. En 1996, 5 de los 10 productores de robot más grandes del mundo eran japoneses, actualmente los fabricantes más grandes de robots industriales son:

Fanuc (Japón), Motoman (Japón), ABB (Suecia) y Kuka (Alemania).

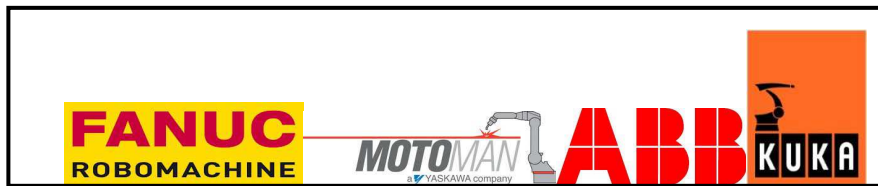


Figura 6: Principales fabricantes de robots industriales del mundo

2.2. Brazos robóticos comerciales

A pesar de que el brazo industrial que se desarrolla en este proyecto tiene las particularidades expuestas en el Apartado 1.1, que lo diferencian de los robots comerciales disponibles en el mercado, es importante estudiar las características principales de los robots comerciales para conocer las soluciones que se han adaptado a lo largo de los cuarenta años de evolución de estos dispositivos y en la medida de lo posible tenerlas en cuenta en nuestro diseño.

2.2.1. ABB IRB 120



Figura 7: Robot ABB IRB120

Características principales:

- Multipropósito, cuarta generación, seis ejes.
- Capacidad de carga 3-4 kg
- Peso reducido: 25kg, estructura de aluminio
- Rápida aceleración

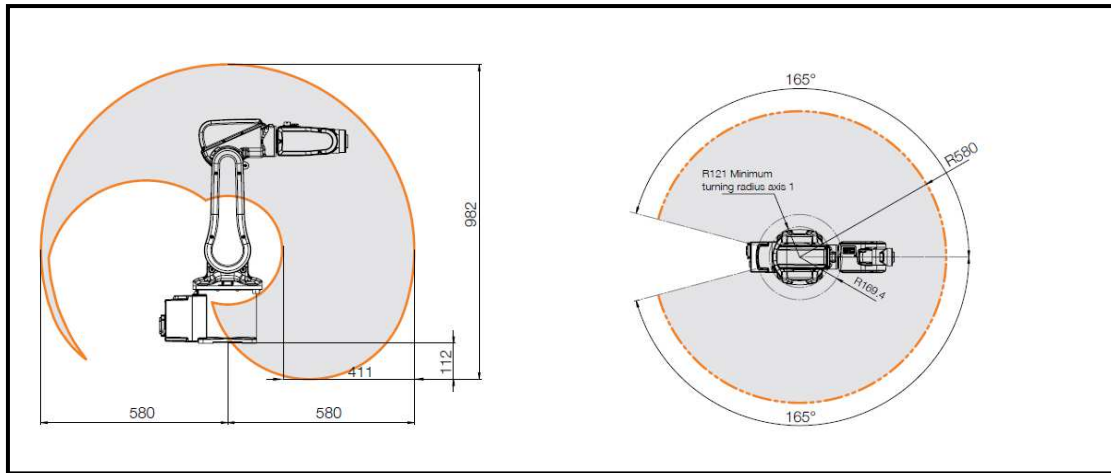


Figura 8: Alcance robot ABB IRB120

2.2.2. KUKA KR 6-2



Figura 9: Robot KUKA KR 6-2

Características principales:

- Capacidad de carga: 6kg
- Multipropósito
- Escaso mantenimiento, alta fiabilidad y larga vida útil

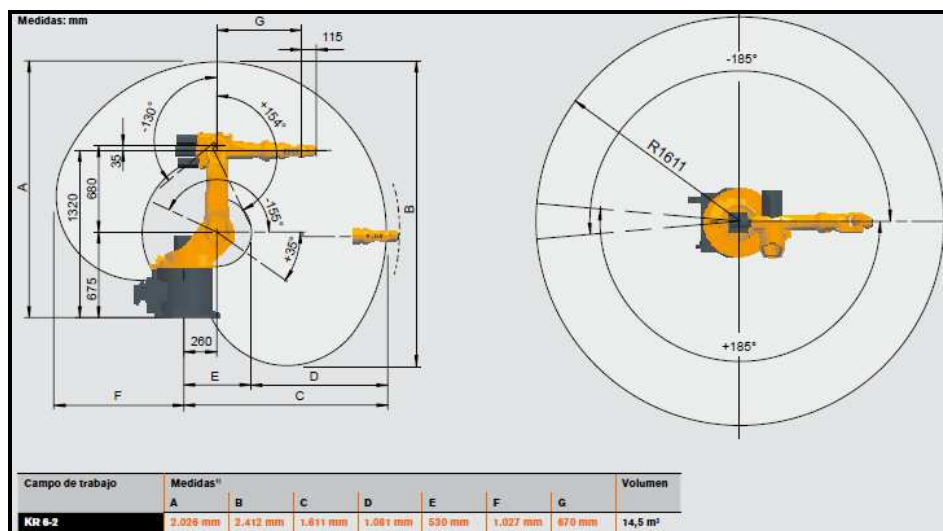


Figura 10: Alcance robot KUKA KR 6-2

2.2.3. MOTOMAN MH5



Figura 11: Robot Motoman MH5

Características principales:

- Multipropósito
- Capacidad de carga: 5kg

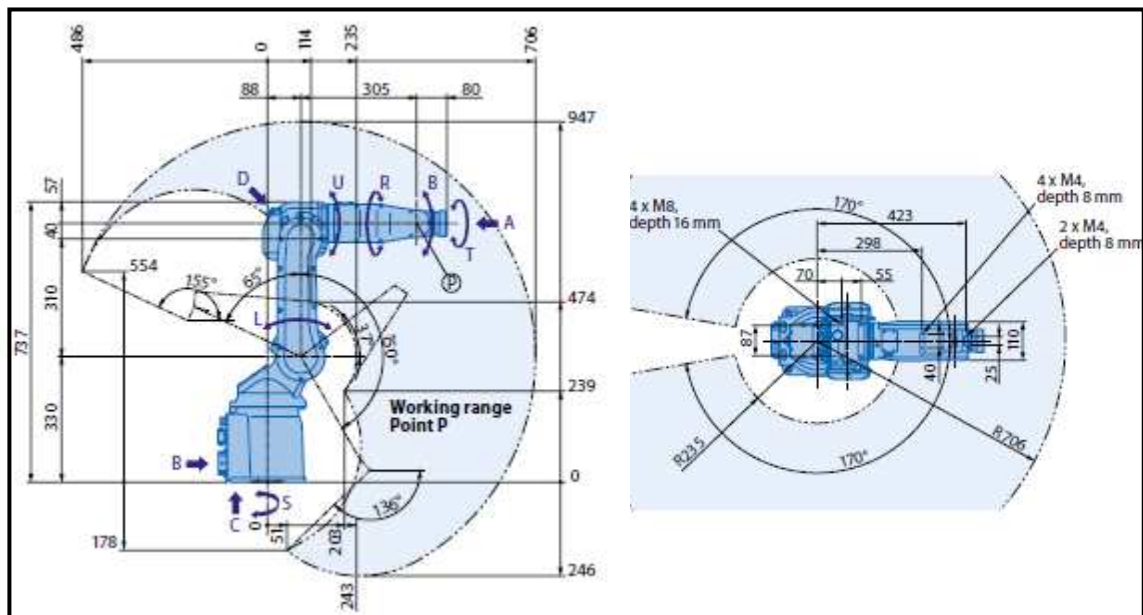


Figura 12: Alcance robot Motoman MH5

2.2.4. FANUC LR MATE

Características principales:

- Multipropósito
- Capacidad de carga: 5kg
- Cableado neumático y eléctrico cerca del reborde aumentando la fiabilidad y mantenibilidad
- Mantenimiento reducido
- IP 67, a prueba de polvo y sumergible en agua



• **Figura 13: Robot Fanuc LR Mate**

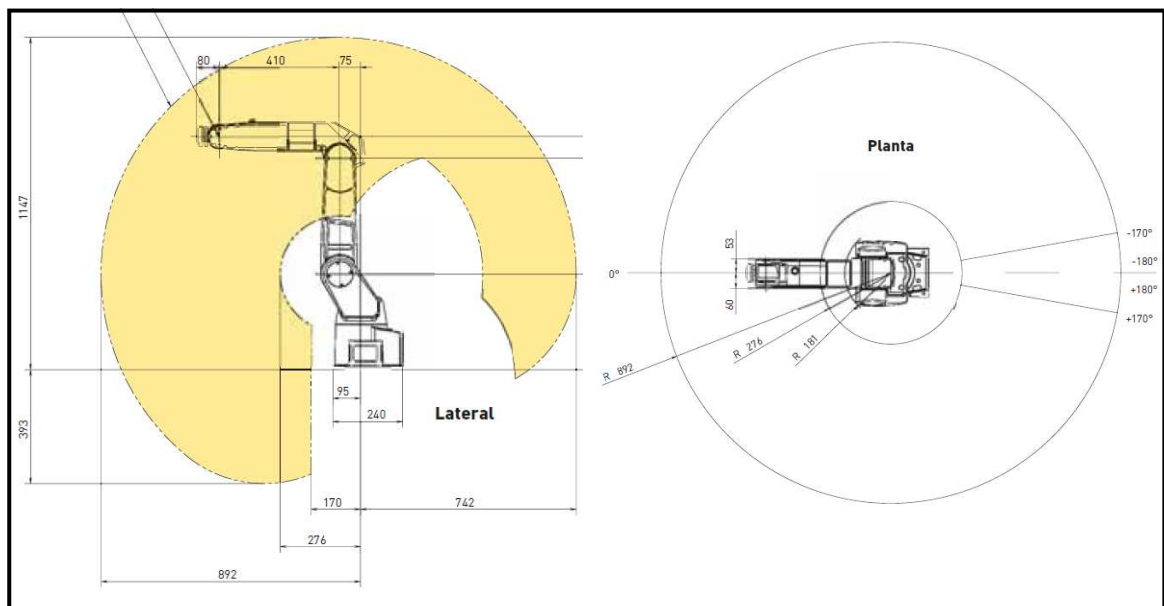


Figura 14: Alcance robot Fanuc LR Mate

En conclusión obtenemos los siguientes datos básicos para la realización de las especificaciones de nuestra máquina:

- Capacidad de carga: 5kg
- Cableado neumático y eléctrico cerca del reborde aumentando la fiabilidad y mantenibilidad
- Mantenimiento reducido
- Peso aproximado: 25kg, estructura de aluminio
- Potencia:

2.3. Características de la instalación neumática

La neumática es una fuente de energía de fácil obtención y tratamiento para el control de máquinas y otros elementos sometidos a movimiento. Posee las siguientes ventajas:

- Generación almacenaje y utilización relativamente baratos
- Bajo índice de peligrosidad en relación a otros vectores energéticos como pueden ser la electricidad o los combustibles.
- Disponible en todo tipo de industrias.

La instalación básica de aire comprimido disponible en las industrias y talleres está formada por:

- Compresor: Toma aire a presión atmosférica y aumenta su presión hasta la presión de diseño del mismo.
- Depósito: es el encargado de acumular el aire comprimido.
- Filtros y sistemas de secado y lubricación: adecúan el aire a las necesidades de la aplicación
- Enfriador: se encarga de evacuar el calor producido en el proceso de compresión



Figura 15: Instalación básica de aire comprimido

La presión máxima para la que suelen trabajar las instalaciones neumáticas de uso industrial es 10bar, por lo que nosotros tendremos en cuenta este límite para realizar nuestros cálculos de fuerza máxima que es posible realizar con nuestros cilindros neumáticos.

2.3.1. Descripción de componentes

A continuación pasamos a describir los principales componentes que formarán parte de nuestra instalación neumática.



Figura 16: Sistema de generación de aire comprimido

Cilindro de doble efecto

Es un actuador neumático, que permite la entrada del aire en ambas cámaras del cilindro. Cuando el aire entra en la cámara sin vástago la fuerza que realiza el pistón es el área de la cámara por la presión del aire, cuando el aire entra en la cámara del vástago la fuerza que ejerce el cilindro es la presión neumática multiplicada por el área de la cámara descontando el área del vástago, por lo que es algo menor que la anterior. La cámara que no está conectada a presión está conectada a escape.

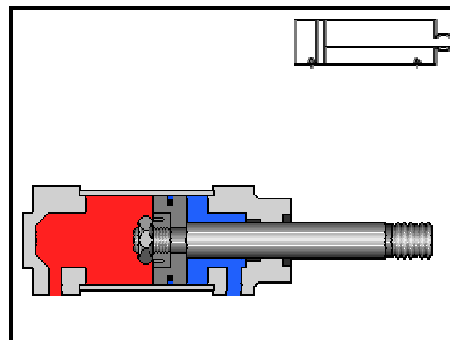


Figura 17: Cilindro de doble efecto

Regulador de caudal unidireccional

Permite regular el paso de aire en una dirección con un cono, la sección de paso aumenta al alejarse el cono de su asiento, ya que la sección entre orificio y cono es cada vez mayor. El paso de aire por el otro camino se encuentra obturado por una válvula de retención el aire empuja la bola contra su asiento, la cual cierra el paso. Sin embargo en el sentido contrario el paso de aire es libre al empujar éste la bola que deja el paso abierto.

Silenciador

Permite que el aire salga al exterior sin hacer ruido ya que tiene que atravesar un laberinto compuesto generalmente por un material sinterizado o una madeja de hilo metálico presada de esta forma aumenta el área por la que pasa el aire disminuyendo la presión sonora.

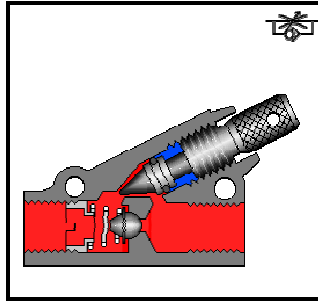


Figura 18: Regulador de caudal unidireccional

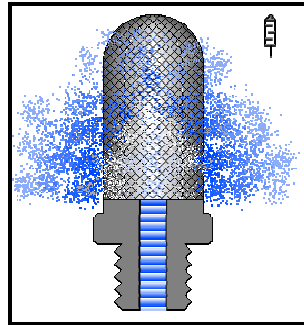


Figura 19: Silenciador

Válvula direccional 5/3

Se trata de una válvula de cinco vías y tres posiciones en la posición central todas, las vías están cerradas (centro cerrado), en una de las otras dos posiciones, la presión pasa a una salida mientras que la otra salida se conecta a escape, en la posición simétrica el comportamiento es también simétrico. En los laterales de la válvula se representan los accionamientos, en el caso de la figura se representan accionamientos manuales por pulsador a diferencia de los accionamientos eléctricos que se representaron en el esquema.

El accionamiento aplica la posición de la válvula más cercana al mismo cuando es activado.

La válvula representada recoge también el símbolo de dos muelles que representan los muelles que retornan la válvula a la posición central cuando los accionamientos dejan de estar activos.

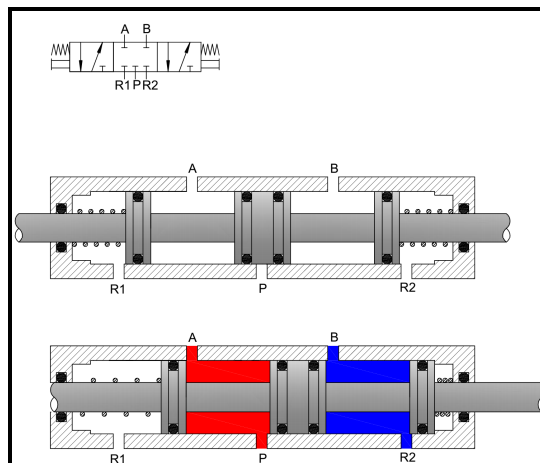


Figura 20: Válvula direccional 5/3

Capítulo 3

Metodología

Se ha desarrollado un proceso de diseño aplicable a un proyecto de este proyecto que se ha recogido en un diagrama de flujo o diagrama de procesos (Figura 21) para conseguir el máximo grado de síntesis del mismo.

Se observa la imposibilidad de realizar todas las tareas recogidas en el mismo en este proyecto y nos centramos sólo en la realización de algunas de ellas, a continuación en la Figura 22 se presenta el diagrama de procesos simplificado teniendo en cuenta únicamente los procesos realizados en el presente proyecto.

La realización de todas las tareas recogidas en el proceso de diseño se estima que requieren un número de horas superior a un año de trabajo de dedicación exclusiva, es decir, 1750 horas. Este número de horas está muy por encima de las previstas para la realización de este proyecto.

Más adelante, en el Apartado 9.2 se resumen las tareas que no se han realizado y quedan pendientes como trabajos futuros.

El criterio que se ha seguido para seleccionar las tareas a realizar ha sido el de poder realizar todas las tareas que dependen secuencialmente unas de otras para realizar el diseño partiendo de la definición de la máquina que queremos diseñar y llegando hasta los planos de fabricación del equipo, dejando aparte las tareas que se pueden realizar en paralelo, pesar de ser todas ellas igualmente necesarias para el diseño.

El diseño no estará completo hasta realizar todas las tareas indicadas en el proceso recogido en la Figura 21.

3.1. Proceso de diseño

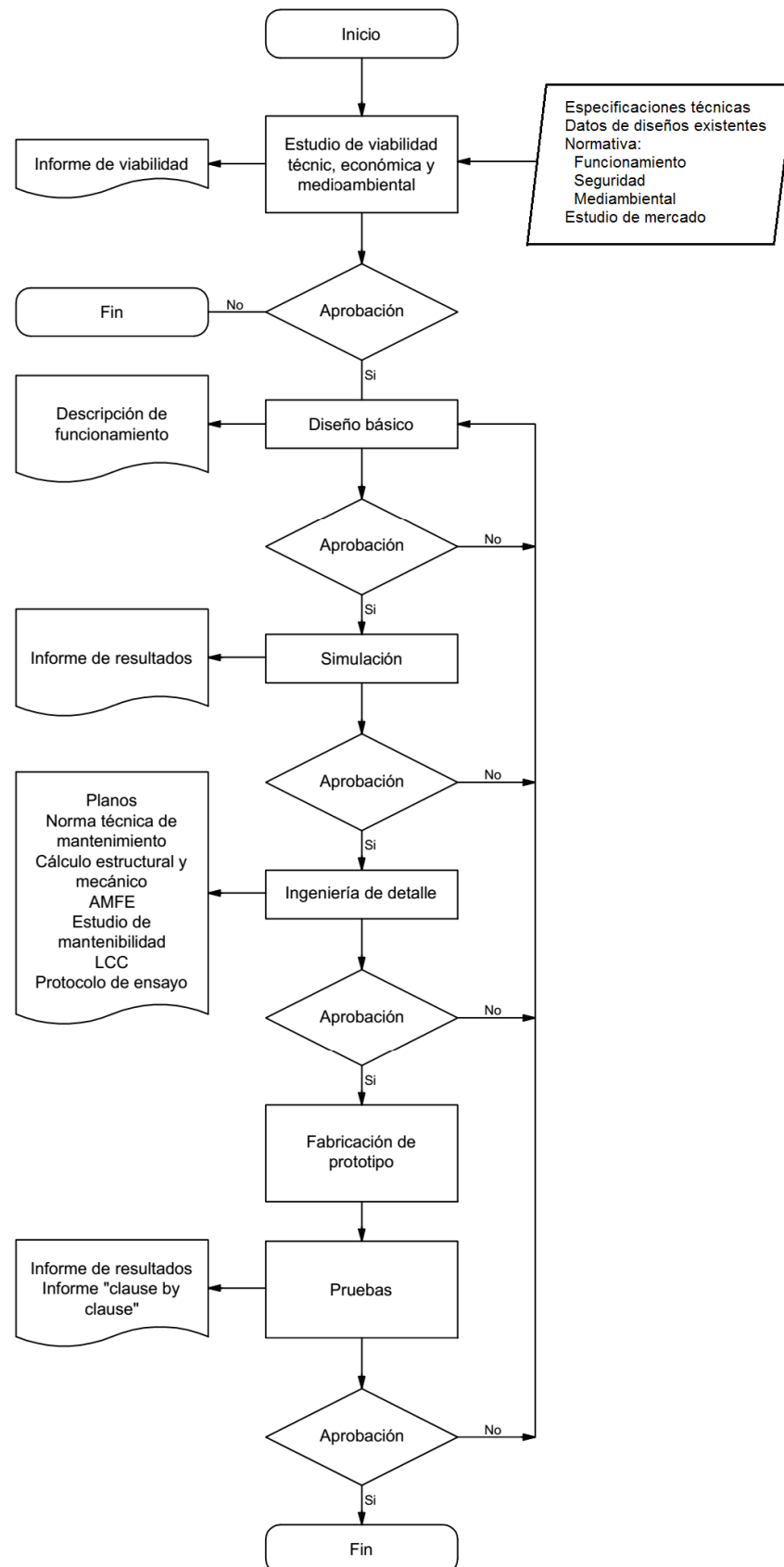


Figura 21: Diagrama de flujo completo del proceso de diseño

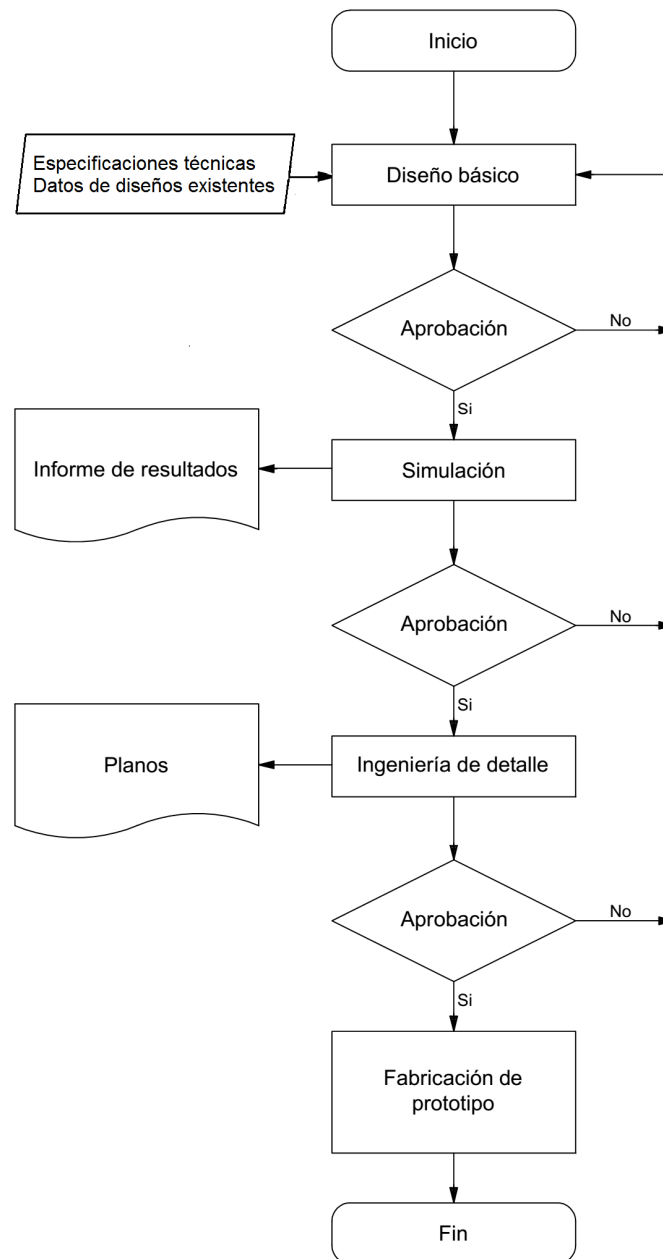


Figura 22: Diagrama de flujo reducido del proceso de diseño realizado

En primer lugar se han definido las especificaciones técnicas básicas necesarias para iniciar el proyecto, a partir de los datos obtenidos de diseños similares y de las características de la instalación neumática.

A partir de estas especificaciones se realiza un primer diseño y su simulación, al obtener resultados no satisfactorios se vuelve a realizar un nuevo diseño. Un vez que los resultados han sido satisfactorios se procede a la fase de ingeniería de detalle y se documentan los planos necesarios para su fabricación y montaje.

Posteriormente se han realizado pruebas, simulando el funcionamiento del equipo en varias aplicaciones para las que ha sido diseñado. Quedan pendientes como trabajos futuros las tareas recogidas en el diagrama Figura 21 que no aparecen en el diagrama Figura 22 y que se describen en el Apartado 9.2.

3.2. Métodos empleados

Para poder llevar a cabo todas las fases del diagrama se han tenido que definir varios métodos.

Se han definido unas reglas para la denominación de los archivos, como veremos en el Apartado 3.3.1 una correcta denominación de los archivos es crucial en el uso de programas CAD-CAE.

En la Tabla 2 se presenta una lista de los archivos que se utilizan en este proyecto.

Archivo	Elemento
C0001.iam	BRAZO NEUMÁTICO
C0002.iam	ESLABÓN 0
C0003.iam	ESLABÓN 1
C0004.iam	ESLABÓN 2
C0005.iam	ESLABÓN 3
P0001.ipt	BASE
P0002.ipt	CARCASA
P0003.ipt	APOYO
P0004.ipt	BULÓN
P0005.ipt	BULÓN
P0007.ipt	BARRA
P0008.ipt	BULÓN
P0009.ipt	EJE
P0010.ipt	BULÓN
P0011.ipt	BULÓN
P0012.ipt	BULÓN
P0013.ipt	BARRA
Portapinzas.ipt	Pieza donde se instalará la pinza del robot, el diseño definitivo dependerá de la pinza
Carga.ipt	Elemento que simula la pinza más la carga
Deposito.ipt	Elemento utilizado en la simulación de la aplicación pintura

Tabla 2: Lista de archivos CAD

Para la ingeniería de detalle se ha definido el cajetín de los planos y otras tablas que permiten definir correctamente la pieza para su fabricación. También se ha definido una nomenclatura para codificar los planos. La nomenclatura definida consta de una letra C, si se trata de un plano montaje de un conjunto o de una letra P, si es un plano de fabricación de una pieza, seguidos de un número correlativo de cuatro dígitos. Se define también una lista de planos donde se registra la codificación del plano y la revisión vigente del mismo (ver Tabla 10)

3.2.1. Cajetín

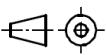

REV.	MODIF.	FECHA			ESCALA 1 : 4	 Universidad Carlos III de Madrid			
			Tolerancia general: ISO 2768-mk		FORMATO A2 ISO 216	REFERENCIA C0001			
				FECHA	NOMBRE	DENOMINACIÓN BRAZO NEUMÁTICO			REV. 00
			PROYECT.	05/04/13	JMG				
			COMPROB.	05/04/13	JMG				
			APROB.	05/04/13	JMG	SUST. A:	SUST. POR:	HOJA	1 / 1

Tabla 3: Cajetín

- En la parte izquierda se recogerán los cambios que se vayan haciendo en el diseño a lo largo de su ciclo de vida, cada cambio se archivará mediante un número de revisión, una clave que se corresponderá con un archivo donde poder consultar toda la información referente al cambio.
- En la parte central se recoge el tipo de proyección, europea en este caso. La escala principal, la norma de tolerancias generales, el tipo de formato o tamaño de hoja según ISO 216 y la fecha en que se realiza el diseño, la comprobación y la aprobación del plano, así como las iniciales de la persona que lo realiza.
- En la parte derecha se registra el logotipo de la empresa a la que pertenece el plano, también es posible indicar en este recuadro alguna anotación de carácter sobre la propiedad intelectual del diseño, también es común recoger la dirección o alguna forma de contacto con la empresa propietaria del mismo. La referencia asignada a la pieza o conjunto, su denominación, la revisión vigente del diseño, el número de hoja y unas casillas donde registrar si el plano sustituye a otro o si bien ha sido sustituido.

3.2.2. Lista de piezas

POS.	CTDAD	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
LISTA DE PIEZAS			

Tabla 4: Lista de piezas

En los planos de conjunto se añade la lista de piezas donde se recoge la cantidad, referencia y descripción de cada una de las piezas que componen el conjunto.

3.2.3. Descripción del material

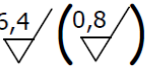


ACABADO SUP.	6,4 / (0,8) 	UNE 1-037	PESO 0.005 kg
MATERIAL	F-1140		UNE 36011
TRAT. TÉRM.	TEMPLADO		ARISTAS
DUREZA	55-60 HRC 1mm		 R=0,2  R=0,2
TRAT. SUP.	PAVONADO		
			ISO 13715

Tabla 5: Tabla de material

En los planos de piezas, se ha definido una tabla donde registrar el acabado superficial según UNE 1-037. Los datos del material y la norma en la que se recogen, los datos de tratamiento térmico y tratamiento superficial, el peso de la pieza y el radio de redondeo o

matado de aristas, válido para aristas en las que no se recoge ninguna otra indicación en el plano, según ISO 13715.

3.3. Software empleado

3.3.1. Software de diseño mecánico

Para el análisis del mecanismo por computador se utiliza la herramienta Autodesk Inventor® 2012 Educational.

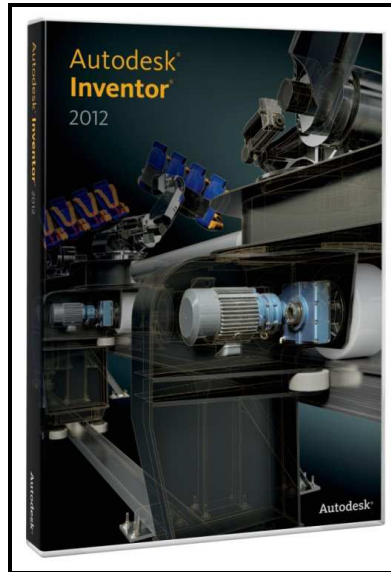


Figura 23: Autodesk Inventor 2012

“Los productos de software de CAD 3D Autodesk® Inventor® constituyen una gama completa y flexible de software para diseño mecánico en 3D, simulación de productos, mecanizado, ingeniería bajo pedido y comunicación de diseños. Inventor permite generar un modelo 3D exacto que facilita el diseño, la visualización y la simulación de los productos antes de fabricarlos.” (Autodesk Corporation)

Los bloques de construcción básicos en un programa de diseño paramétrico tridimensional como Inventor son las piezas, que se guardan en archivos *.ipt. Se crean definiendo las características geométricas, que a su vez se basan en bocetos (dibujos en 2D). Por ejemplo, para hacer una pieza con forma de cubo, el usuario del programa primero haría un boceto con forma de cuadrado y después utilizaría la herramienta extrusión para extruir el cuadrado 2D y darle volumen, convirtiéndolo en un cubo 3D, cada una de estas modificaciones sobre la pieza se denomina operación.

La ventaja de los programas paramétricos es que todos los bocetos y especialmente sus parámetros, que son básicamente sus cotas se pueden modificar posteriormente, si se hace correctamente, el resto de las operaciones de la pieza se actualizan automáticamente a este nuevo valor del parámetro.

Es importante, tener en cuenta otras propiedades de la pieza, además de la geometría, está la densidad, resistencia mecánica, coeficiente de fricción, etc. Qué según el análisis o simulación que se pretenda realizar tendrán mayor o menor relevancia.

Posteriormente, las piezas se “conectan” entre sí para dar lugar a ensamblajes, archivos *.iam. Los ensamblajes pueden consistir en piezas u otros subensamblajes. En ambos casos, los elementos, piezas o subensamblajes, son ensambladas agregando restricciones entre las superficies, bordes, planos, puntos y ejes de las piezas que contienen.

Por ejemplo, si se pretende ensamblar un piñón sobre un eje, se añade una restricción de inserción entre el eje y el eje del piñón consiguiendo que ambos elementos sean coaxiales. La distancia entre la superficie exterior del piñón y el extremo del eje también se puede especificar en la misma restricción de inserción consiguiendo posicionar axialmente las piezas.

Otras restricciones geométricas típicas son: coincidencia, nivelación, ángulo, tangencia...

Inventor utiliza formatos específicos de archivo para las piezas (.IPT), ensamblajes (.IAM), vista del dibujo (.IDW) y presentaciones explosionadas (IPN). Hay que tener en cuenta que los ensamblajes o los archivos de dibujo (planos) utilizan los archivos de pieza o ensamblaje a partir de los cuales se han generado, esto sin duda es una gran ventaja, si se produce algún cambio en una pieza o subensamblaje se recoge automáticamente en el conjunto donde está montado o en las vistas del plano donde aparece, pero hace que haya que tener especial precaución a la hora de guardar los archivos, cualquier cambio en la denominación del mismo hace que el resto de archivos donde es utilizado no se puedan abrir.

Hay que tener en cuenta que los ensamblajes recogen la forma de montar las piezas (o subensamblajes) y los planos las vistas y acotación de las mismas pero no recogen la geometría de las mismas que ya está recogida en el archivo de pieza (o subensamblaje). Se establecen así unas relaciones de dependencia denominadas: padres-hijos, que es necesario dominar si se pretende utilizar este tipo de programas.

Estas mismas relaciones de padre-hijo se dan entre operaciones de una misma pieza, y es necesario dominarlas también, es el precio que hay que pagar por utilizar este tipo de programas paramétricos, una vez dominadas las ventajas que presentan a la hora de realizar modificaciones compensan con creces el proceso de aprendizaje.

En la Figura 24 presentamos un ejemplo del modo de realizar un modelado en 3d.

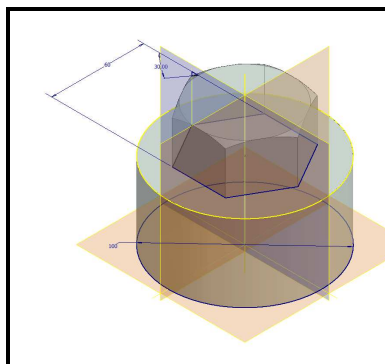


Figura 24: Ejemplo de Modelado 3d

El sólido modelado está compuesto de tres operaciones, el cilindro inferior, el hexágono superior y el corte de las esquinas del hexágono.

El cilindro inferior se puede generar a partir de una extrusión de un círculo o de la revolución de un rectángulo, en este caso sea extruido un círculo de diámetro 100, esta cota de diámetro es un parámetro. En el dibujo paramétrico a diferencia del dibujo convencional primero se dibujan las formas y posteriormente se acotan o restringen, por ejemplo en el caso del hexágono primero se dibuja la forma y posteriormente se crean restricciones del tipo: el centro del hexágono coincide con el centro del cilindro, un segmento del hexágono es paralelo a uno de los planos base, etc.

En las operaciones que sabemos que, en la pieza real, se realizan en torno, utilizaremos la herramienta revolución, por ejemplo en el matado de las esquinas del hexágono utilizamos la revolución de una geometría de triángulo en lugar del cometer el error de intentar generar esta forma mediante chaflanes lineales.

La ventaja de este método paramétrico es que cambiando algunos parámetros o cotas conseguimos que el resto de geometría se adapte a los cambios automáticamente, en este ejemplo hemos modificado el diámetro del cilindro y la altura del hexágono y automáticamente obtenemos el sólido modelado de la Figura 6.

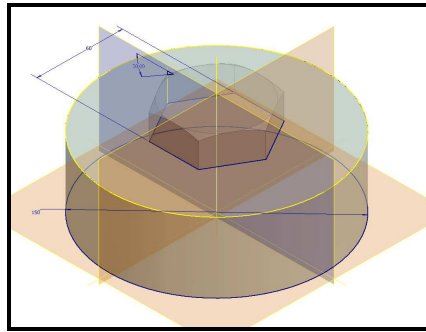


Figura 25: Ejemplo de Modelado 3d modificado

Módulo de simulación dinámica

Para el análisis cinemático y dinámico del mecanismo se utiliza el módulo de simulación dinámica del programa.

En el entorno de simulación dinámica se pueden definir las uniones o juntas mecánicas entre elementos o eslabones. También se puede aplicar fuerzas, aceleraciones, velocidades o movimientos a los elementos para realizar la simulación dinámica del mecanismo.

Dentro del entorno de simulación dinámica tenemos las herramientas que se ilustran en la Figura 27,

- 1.- Insertar uniones entre elementos, existen varios tipos de uniones cada una de las cuales permite restringir ciertos grados de libertad y liberar otros, por ejemplo tenemos la unión de pasador, la unión cilíndrica la unión prismática, etc.
- 2.- Aplicar fuerzas o momentos en la geometría que actúan, incluida la gravedad
- 3.- Especificar los resultados que queremos obtener de forma gráfica o mediante tablas
- 4.- Producir un video del mecanismo analizado en movimiento.
- 5.- Configurar en simulador, se define la duración total, número de puntos intermedios de simulación, etc.

3.3.2. Software de diseño neumático

Para realizar y simular el esquema neumático se ha utilizado el software Automation Studio 5.2

Este software nos permite crear el esquema con la simbología normalizada según ISO 1219-1 y además nos permite realizar una simulación del funcionamiento del circuito una vez introducidos todos los parámetros asociados al componente representado por cada uno de los símbolos. Este software también permite simular circuitos hidráulicos y eléctricos y además asociar unos a otros, es decir podríamos simular un circuito de control eléctrico o electrónico y asociar por ejemplo las bobinas conectadas a este circuito con las bobinas operadoras de las electroválvulas neumáticas.

Este programa permite una simulación de la respuesta en el tiempo de los circuitos neumáticos, no se limita sólo a una simulación entre estados. Es posible visualizar la gráfica de la variable que deseemos obtener a lo largo del tiempo, permite visualizar, por ejemplo, las vibraciones que se producen en la presión o en la posición de un cilindro al aplicar una presión neumática mediante la válvula de control.

Para conseguirlo arrastramos mediante el ratón, el componente que deseamos visualizar al monitor de visualización y marcamos las casillas correspondientes a las variables que queremos visualizar, podemos marcar hasta seis. También es posible exportar los datos en formato *.txt, para poder tratarlos posteriormente con otro programa.

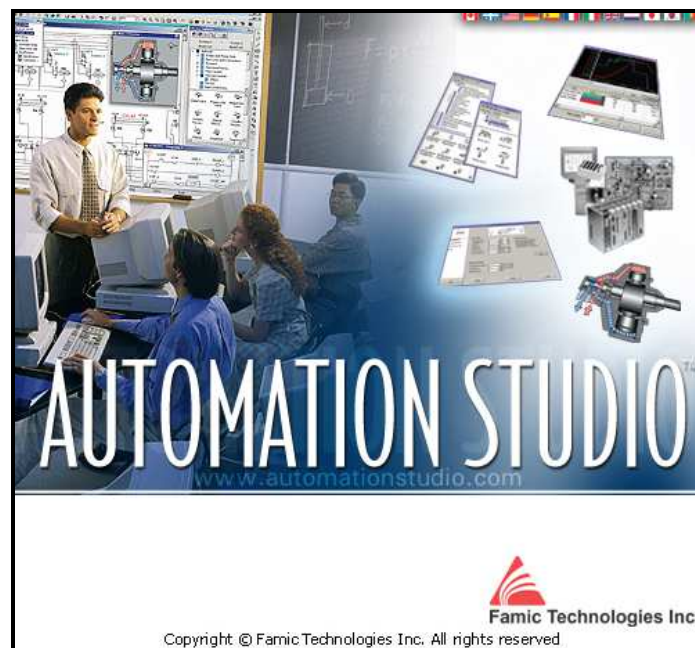


Figura 28: Software de simulación Automation Studio

Capítulo 4

Diseño mecánico

El estudio cinemático y dinámico de una máquina o mecanismo, consiste en analizar los movimientos absolutos y relativos entre los elementos del sistema, así como las fuerzas de interacción entre los mismos, que generan dichos movimientos y transmiten el esfuerzo útil para la de la aplicación de trabajo a la que está destinada la máquina.

Existen dos maneras de abordar el estudio:

- Análisis de máquinas.
- Síntesis de máquinas.

El primero desarrolla el comportamiento cinemático y dinámico de máquinas prefijadas y el segundo trata de definir la estructura de la máquina para que realice determinados movimientos a partir de fuerzas prefijadas.

En este proyecto se parte de un mecanismo propuesto. El mecanismo propuesto se analizará según las técnicas del análisis de máquinas propuestas por la Teoría de Máquinas y Mecanismos. A partir de este análisis se estudiarán las mejoras a realizar para lo cual se utilizarán técnicas de síntesis de máquinas.

Definimos máquina, para los intereses del presente estudio, como un agrupamiento de elementos sólidos rígidos, adecuadamente dispuestos para mantenerse en contacto permanente y permitiendo el movimiento relativo entre ellos, siendo capaz de transmitir movimientos y esfuerzos desde unos elementos a otros. Los sólidos rígidos que constituyen las máquinas se denominan: eslabón, elemento, miembro o barra. (García Prada, Castejón Sisamón, & Rubio Alonso, 2007)

Un eslabón puede estar formado por varias piezas unidas entre sí por tornillos, remaches, soldadura, etc. de forma que se comporten como un sólido rígido.

Los movimientos relativos típicos entre eslabones son:

- Par de rotación, permite el giro entre dos eslabones del mecanismo

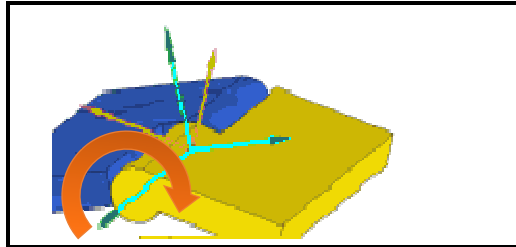


Figura 29: Par de rotación (o revolución)

- Par de traslación, permite el desplazamiento lineal entre dos eslabones del mecanismo

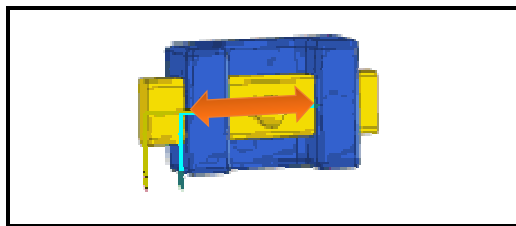


Figura 30: Par de traslación (o prismático)

- Par helicoidal, convierte el movimiento de giro de un eslabón del mecanismo (eslabón tornillo) en movimiento lineal del otro eslabón (eslabón tuerca), el funcionamiento del par también puede ser el recíproco.

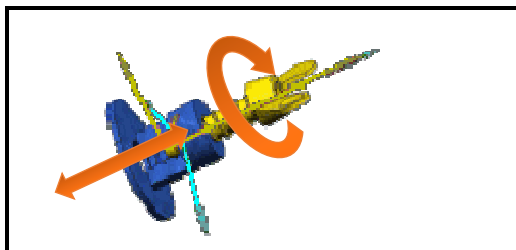


Figura 31: Par helicoidal o de tornillo

4.1. Análisis de mecanismo

4.1.1. Clasificación del mecanismo

Partimos de un primer diseño o diseño preliminar, este diseño ha sido adaptado del diseño de una grúa. Sobre este diseño preliminar realizaremos la primera fase de análisis del mecanismo.

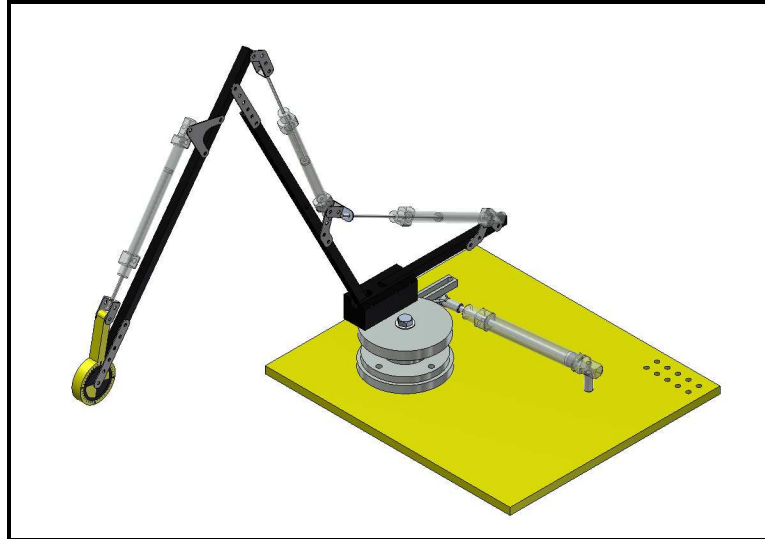


Figura 32: Vista en isométrica del diseño preliminar

Prácticamente, la totalidad de las máquinas pueden ser estudiadas como una concatenación y superposición de mecanismos planos en las tres direcciones del espacio. (García Prada, Castejón Sisamón, & Rubio Alonso, 2007)

En primer lugar, nos damos cuenta de que separando el estudio del movimiento de giro de la base del resto de movimientos del mecanismo, tenemos por una parte un mecanismo plano y por otra un mecanismo que consiste únicamente en un giro sobre un eje de rotación.

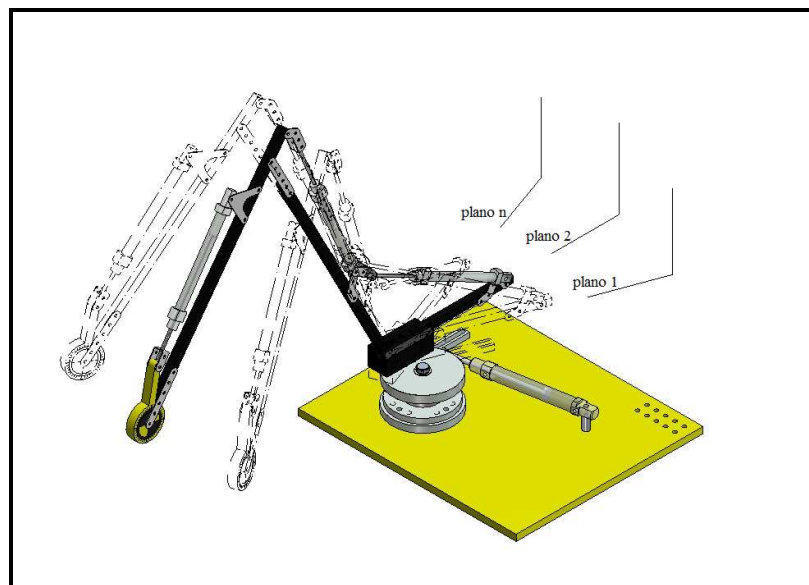


Figura 33: Mecanismo como un mecanismo plano y un eje de rotación

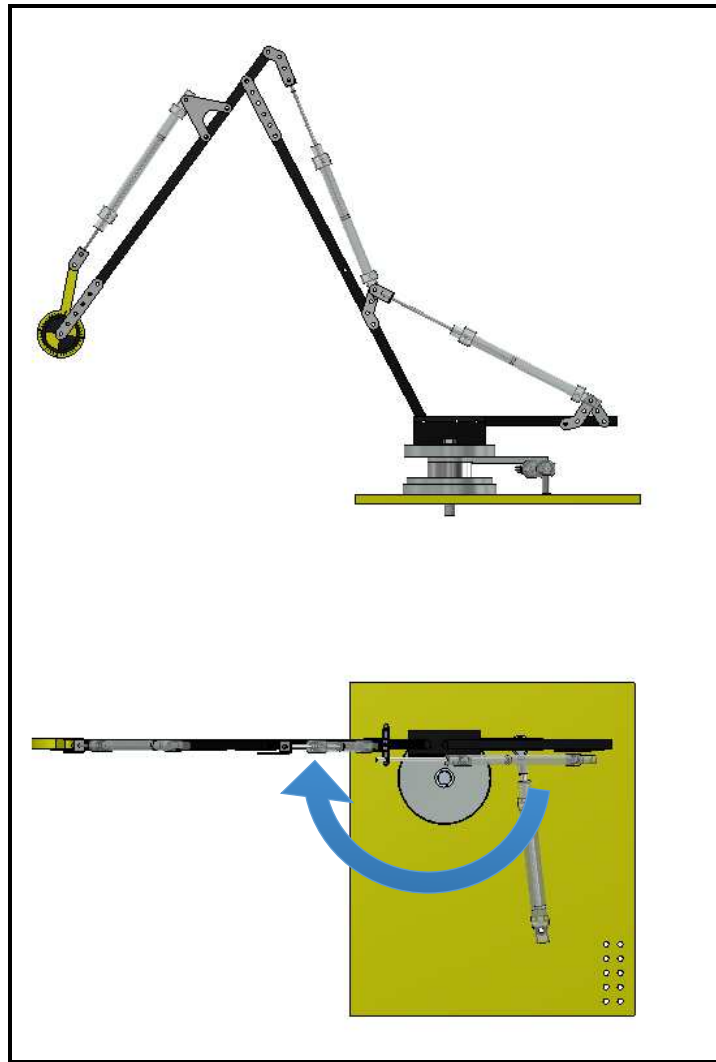


Figura 34: Alzado: Mecanismo plano; Planta: Movimiento de giro de la base del mecanismo

El mecanismo plano, consta de 12 pares cinemáticos o juntas, nueve de ellas de rotación y tres de ellas de traslación. Como se puede ver en la Figura 35.

El mecanismo está compuesto por diez eslabones como se puede ver en la Figura 36.

Los eslabones que tienen una pareja de pares elementales en sus extremos se denominan eslabones simples. Aquellos eslabones que tienen más de dos pares elementales se denominan eslabones compuestos, disponemos por tanto de ocho eslabones simples, y dos eslabones compuestos (eslabones 2 y 3).

Es habitual referenciar el mecanismo por un código de letras según los tipos de par presentes, se asigna la letra P al par prismático o de traslación, R al par de rotación y C al par cilíndrico.

La codificación del mecanismo es: PPRRRRRRRRRR

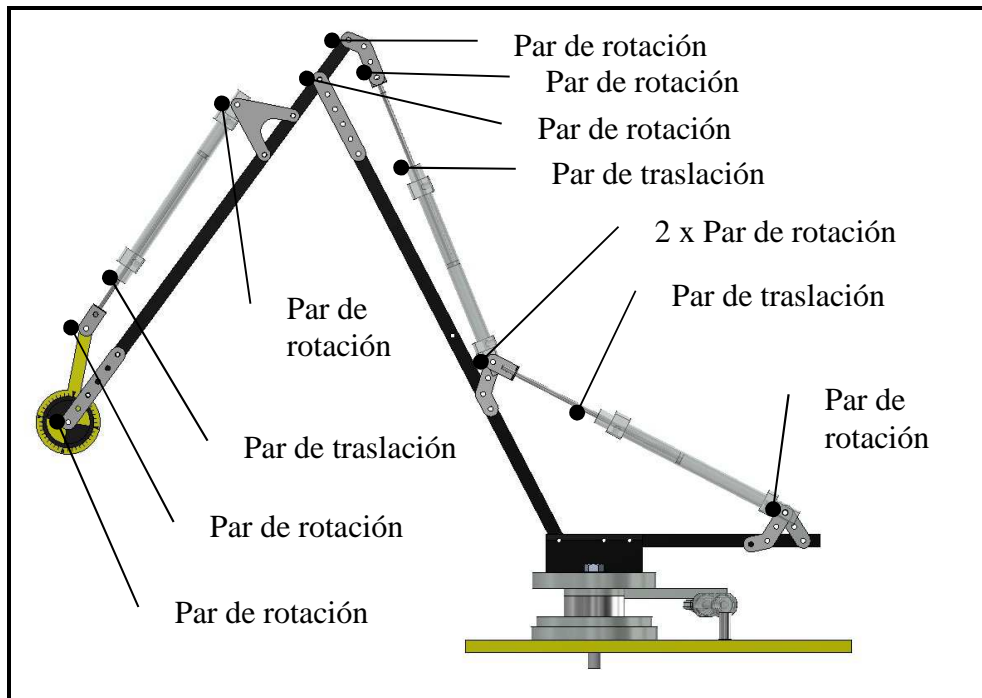


Figura 35: Pares cinemáticos del mecanismo plano

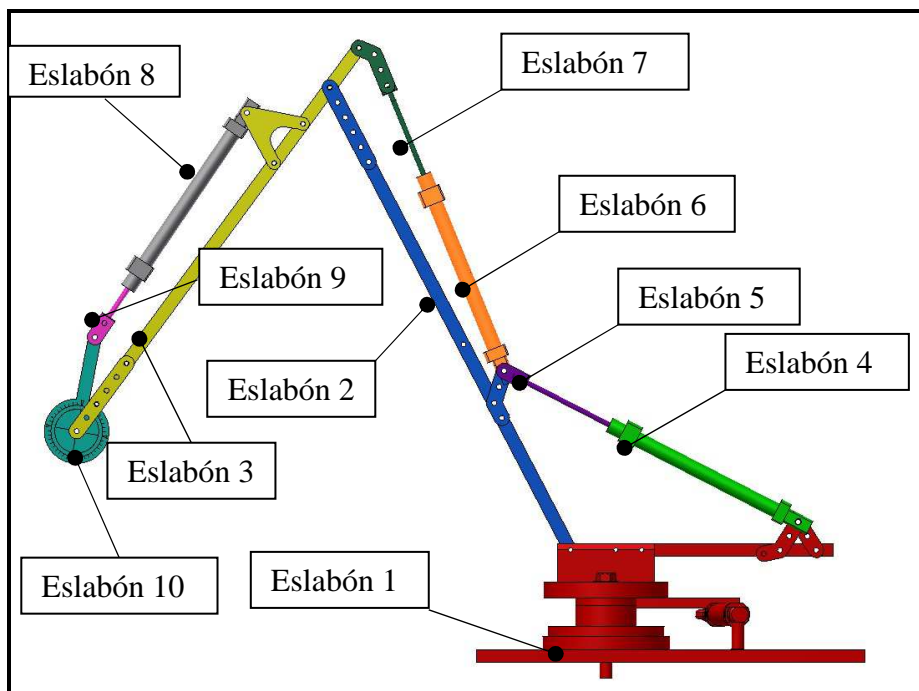


Figura 36: Eslabones del mecanismo plano

4.1.2. Grados de libertad

Los grados de libertad (GDL) del mecanismo son las variables independientes a definir para conocer en cualquier instante el estado de cualquier eslabón.

Un mecanismo de 10 eslabones tiene inicialmente $3 \cdot 10 = 30$ GDL correspondientes a la posición en las dos dimensiones del plano y al giro de cada uno de sus eslabones.

Sin embargo los eslabones están unidos mediante pares que afectan a sus grados de libertad.

- El par de rotación sólo permite el movimiento relativo de giro 1GDL
- El par de traslación permite sólo el movimiento de traslación según una dirección del espacio 1GDL

El “Criterio de Gruebler” sirve para obtener el número de grados de libertad del mecanismo y clasificarlo.

$$GDL = 3(N - 1) - 2f_1 - f_2 \quad (\text{Fórmula de Gruebler})$$

Donde:

- N = número de eslabones
- f₁ = número de pares de 1GDL (restringen 2GDL)
- f₂ = número de pares de 2GDL (restringen 1GDL)

Clasificación:

- Si GDL > 1, mecanismo G-GDL.
- Si GDL = 1, mecanismo desmodrómico.
- Si GDL = 0, estructura isostática.
- Si GDL < 0, estructura hiperestática.

$$GDL = 3(10 - 1) - 2 \cdot 12 = 3 \cdot 9 - 24 = 3$$

Mecanismo de 3GDL

4.1.3. Simplificación del mecanismo

Se observa que es posible considerar el mecanismo como la superposición de tres mecanismos de cuatro eslabones, para ello se tiene en cuenta el movimiento del conjunto cuando aplicamos un movimiento a uno de los tres cilindros considerando fijo el resto,

Se obtienen los mecanismos simplificados representados en las Figura 37, Figura 38 y Figura 39.

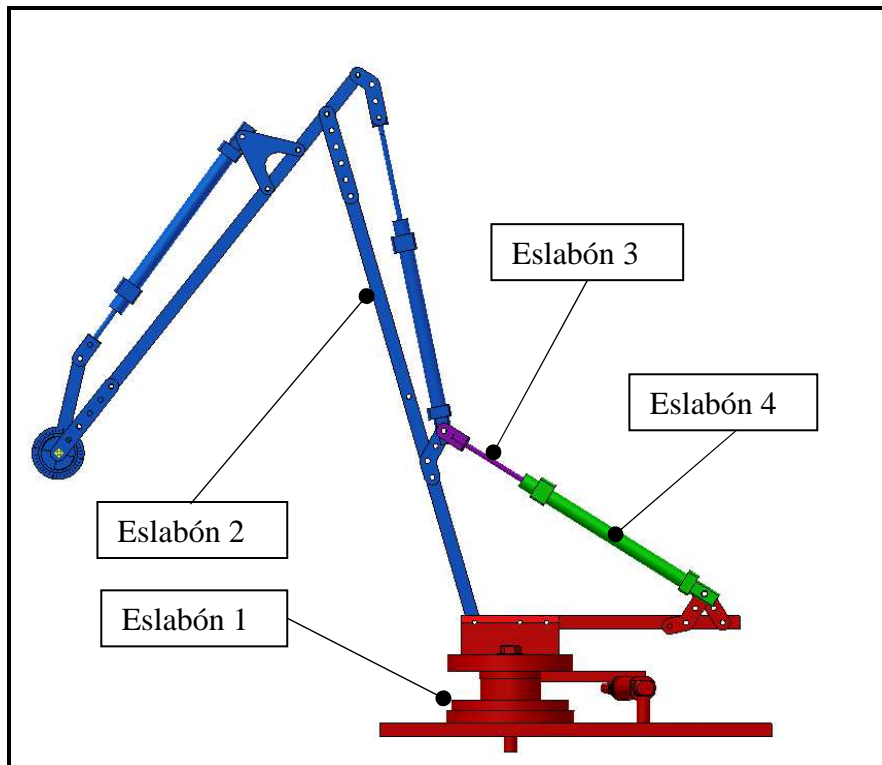


Figura 37: Eslabones del mecanismo considerando sólo el movimiento del cilindro 1

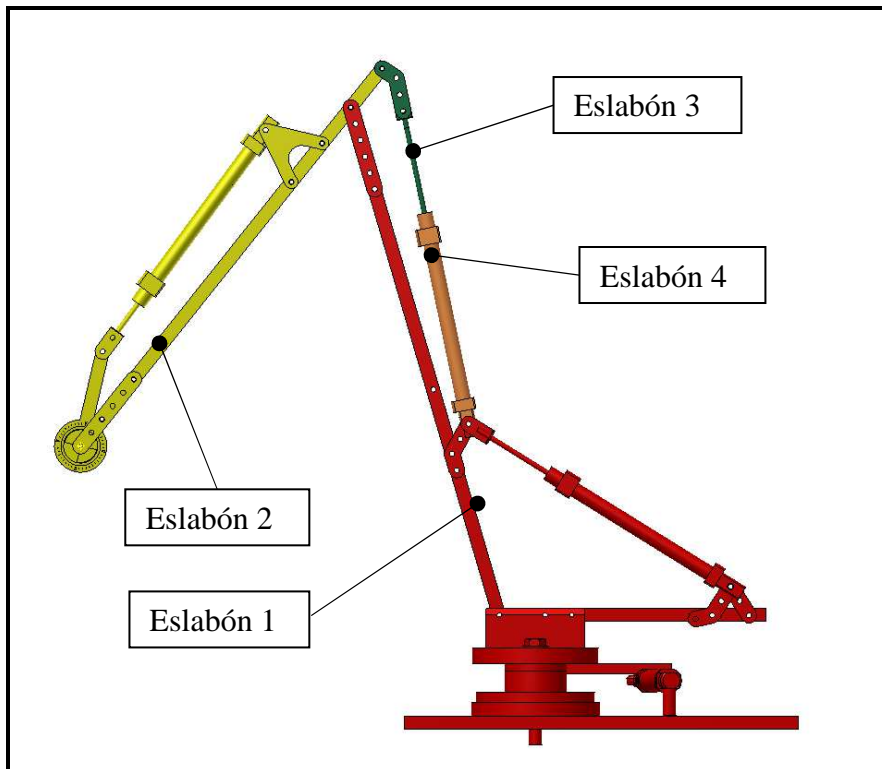


Figura 38: Eslabones del mecanismo considerando sólo el movimiento del cilindro 2

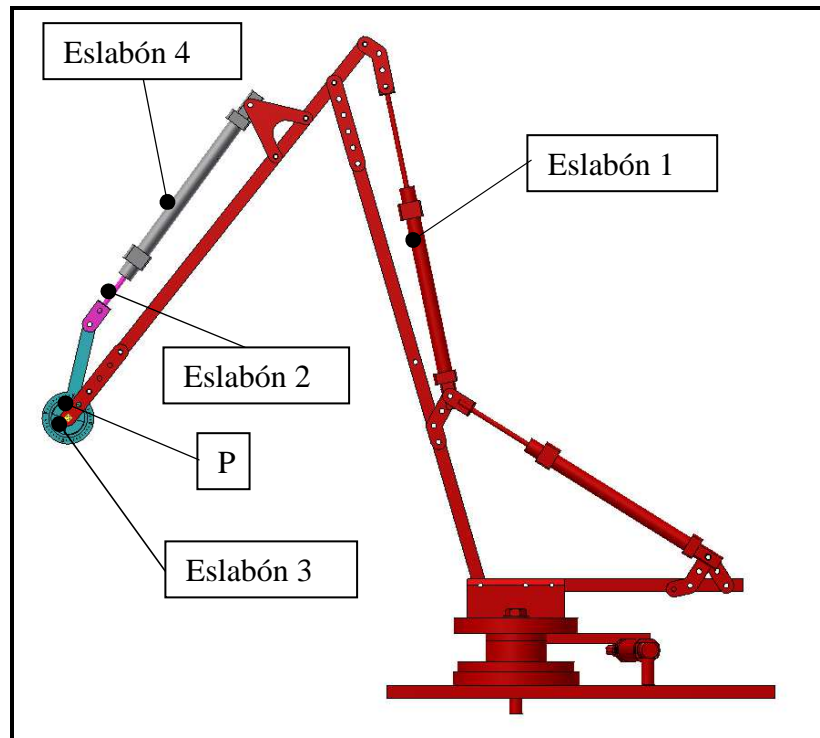


Figura 39: Eslabones del mecanismo considerando sólo el movimiento del cilindro 3

Se observa que el punto que se ha marcado como “P”, no va a tener movimiento de traslación debido al cilindro 3. Este cilindro no va a tener ninguna función en la posición del punto P, simplemente sirve para dar movimiento de rotación al eslabón 2, lo que sirve para posicionar la garra del robot en el ángulo requerido.

Se puede considerar que el cilindro 1 y cilindro 2 sirven para posicionar el punto “P” en el espacio, situándolo en las coordenadas horizontal y vertical, mientras que el cilindro 3 sirve para dar un ángulo de giro a elemento que se sitúa en el punto “P”.

Por este motivo para el cálculo de la posición de punto “P” no vamos a tener en cuenta el cilindro 3.

A pesar de que no es posible aplicar el principio de superposición en el análisis de mecanismos debido a que la relación entre los parámetros del problema no es siempre lineal, de esta forma podemos ver de forma sencilla e intuitiva el funcionamiento del mecanismo, posteriormente se realizará un cálculo por asistido por computadora utilizando para obtener resultados precisos.

4.1.4. Análisis cinemático del mecanismo

Se ha realizado un análisis manual del mecanismo con el objetivo de familiarizarnos con su funcionamiento. De esta forma será más sencillo modelar el mecanismo para su análisis por computadora. También conseguiremos interpretar de forma correcta los resultados que obtengamos en dicho análisis.

El análisis se ha realizado utilizando las técnicas gráficas y siguiendo las simplificaciones expuestas en el apartado anterior.

Como se ha observado anteriormente el mecanismo queda reducido a un cuadrilátero articulado del tipo PRRR se trata de un mecanismo de 1 GDL a partir del conocimiento del estado de uno de los eslabones móviles su puede obtener el estado de todos los demás.

El procedimiento para resolver el problema gráficamente consiste en hallar todos los centros instantáneos de rotación a partir de los centros instantáneos de rotación dados. Los centros de rotación dados son los puntos de unión de los eslabones.

El resto de centros instantáneos de rotación, se pueden hallar a partir de la propiedad de los centro instantáneos de rotación conocida como teorema de Kennedy: "Si tenemos tres eslabones (sólidos rígidos) animados de movimiento relativo entre ellos (ya sea que estén o no conectados entre sí) los centros instantáneos de rotación relativos entre los tres eslabones han de estar alineados".

Para analizar el problema hemos asignado una velocidad relativa unidad entre el eslabón 3 y el eslabón 4 (eslabones que componen el cilindro neumático).

Por el método de las velocidades relativas y conocida las direcciones de las velocidades resultantes, se halla la velocidad del punto marcado como "a".

A partir de la velocidad del punto "a" se obtiene la velocidad del punto "b" por pertenecer al mismo eslabón. Con lo que ya conocemos la velocidad de un punto de cada eslabón y podemos determinar el resto.

Se procede de forma similar en el caso de que el movimiento se produzca únicamente en el cilindro 2 y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 38 y Figura 39.

Analizamos la trayectoria límite que puede seguir el mecanismo, para ello se posiciona, por turnos, cada uno de los cilindros en una de sus posiciones extremas, que son completamente estirada y completamente recogida y se hace variar la posición del otro cilindro entre sus dos posiciones límite. De esta forma se obtiene una región dentro de la cual están todos los posibles puntos de posicionamiento del mecanismo en el espacio.

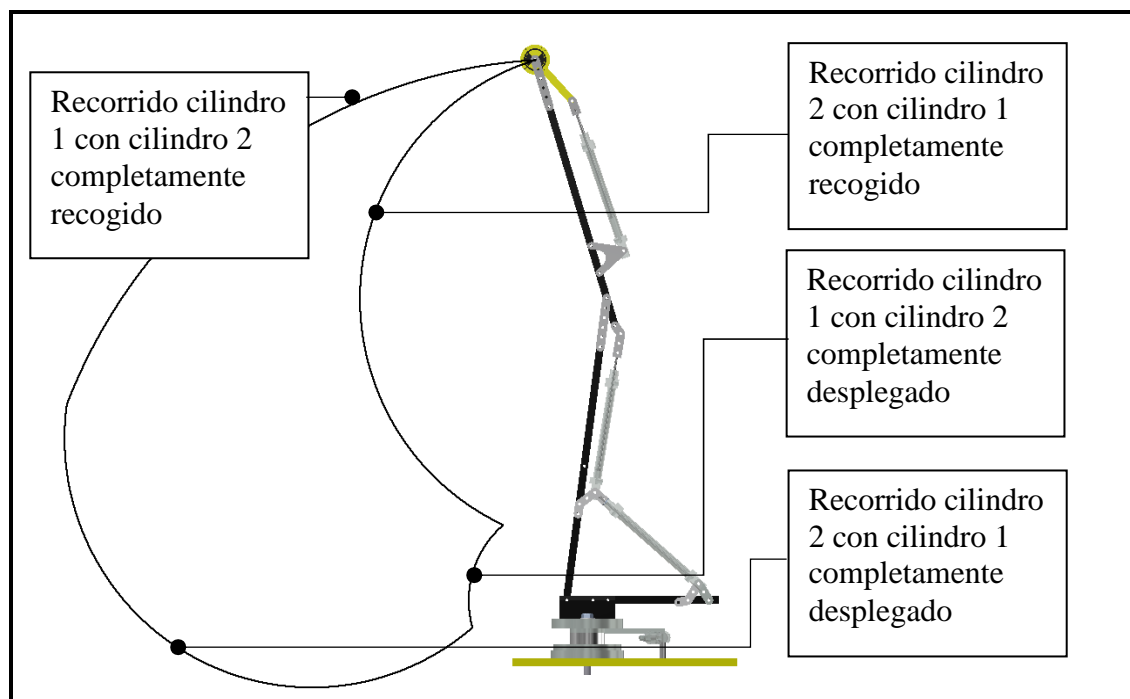


Figura 40: Trayectoria límite del mecanismo

Se ha obtenido la siguiente gráfica de fuerza aplicada en los cilindros para alcanzar estas posiciones hay que tener en cuenta que solamente se ha considerado el peso de los eslabones sin aplicar ninguna carga en el mecanismo,

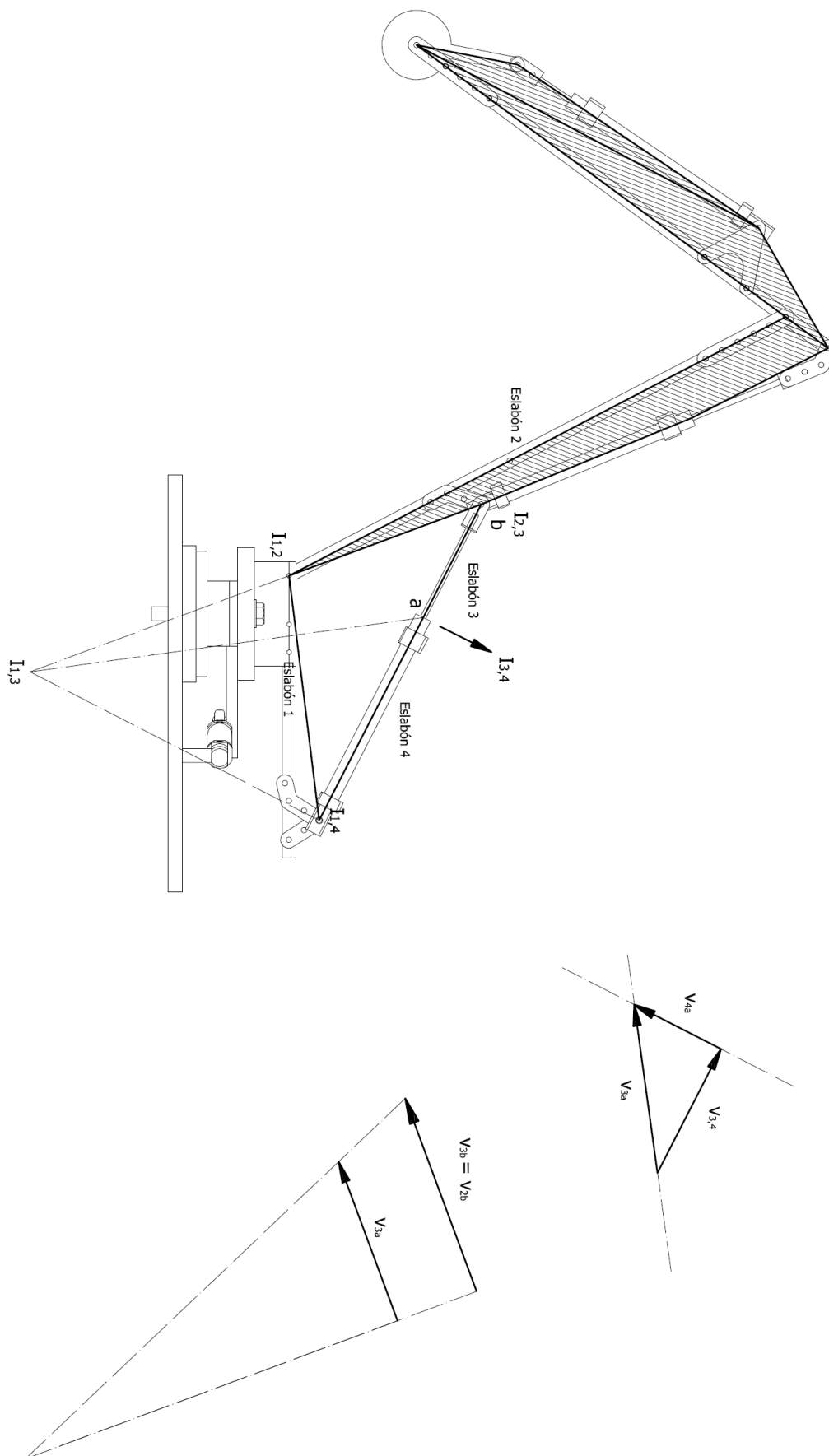


Figura 41: Análisis cinemático considerando solamente el cilindro 1

4.2. Síntesis de mecanismo

4.2.1. Características de funcionamiento

Para definir las características de funcionamiento del equipo se han analizado los datos recogidos en el Apartado 2.2 sobre robots comerciales disponibles en el mercado.

En la siguiente tabla se resumen los datos obtenidos:

Carga de trabajo	5kg
Montaje	En el suelo, invertido sin ninguna restricción Permite: <ul style="list-style-type: none">- Instalar varios robots uno al lado del otro- Área mayor de trabajo en el montaje invertido ya que se evita la interferencia consigo mismo
Cableado	Neumático y eléctrico colocado cerca del reborde aumentando la fiabilidad del sistema
Protección frente líquidos y polvo	IP67 DIN40050-9: <ul style="list-style-type: none">- El polvo no debe entrar bajo ninguna circunstancia- El objeto debe soportar (sin filtración alguna) la inmersión completa a 1 metro durante 30 minutos.
Peso	26 – 29kg
Potencia típica en trabajo	400W
Velocidad	Eje 1: 450°/s Eje 2: 450°/s Eje 3: 720°/s
Momento de inercia	Eje 1: 12kgm ² Eje 2: 12kgm ² Eje 3: 6.7kgm ²

Tabla 6: Condiciones de funcionamiento

Algunas de estas características no se van a tener en cuenta en nuestro diseño debido a que tenemos un concepto distinto al que utilizan los robots comerciales, otras nos servirán de ayuda para definir las condiciones de operación de nuestra máquina.

En nuestro caso contamos con actuadores neumáticos lineales en lugar de rotatorios, lo que nos limita el área de trabajo y algunas características de funcionamiento como la velocidad máxima.

Respecto a la velocidad después de realizar varias simulaciones se ha observado que no es un factor determinante para calcular la fuerza necesaria en los cilindros, ya que las fuerzas de inercia debidas a las aceleraciones no son comparables a los esfuerzos estáticos necesarios para equilibrar el sistema.

4.2.3. Segundo diseño

En primer lugar se han vuelto a diseñar algunas piezas de la estructura intentando conseguir una estructura más robusta acorde con los diseños de equipos similares que se han analizado en el Apartado 1.2.3

Se han respetado la posición de todos los puntos de enlace de los pares cinemáticos por lo que se respetan todas las dimensiones relevantes del mecanismo desde el punto de vista cinemático. De esta forma se consigue que todo el análisis cinemático y dinámico realizado

anteriormente sirva también para el nuevo mecanismo, excepto la influencia que tengan el peso de los componentes y sus momentos de inercia.

Los cambios realizados han sido los siguientes,

- Integración de varios componentes en una sola pieza, en el diseño anterior teníamos una estructura de tubos y unas piezas de chapa planas de refuerzo, se han integrado varias de estas piezas para conseguir las siguientes ventajas,
 - Disminuir el número de uniones con lo que se facilita el montaje y desmontaje, lo que se reduce el tiempo de fabricación y el tiempo de las intervenciones de mantenimiento, también se reduce el número de elementos susceptibles de generar pérdidas de energía por fricción
 - Además en las uniones se han incluido cojinetes de fricción de bronce y teflón para reducir las pérdidas mecánicas.
 - El diseño es más compacto y el material está más cerca del plano del centro de masas con lo que se consigue disminuir el momento de inercia del componente.

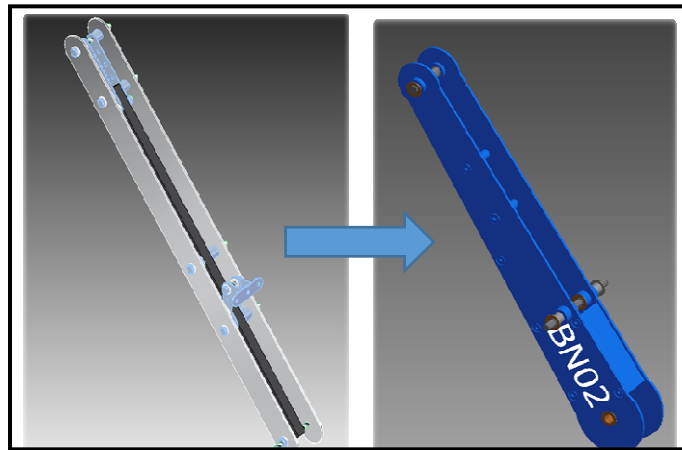


Figura 43: Evolución del diseño del eslabón 1

- El inconveniente de este diseño es que necesita la fabricación de piezas más elaboradas desde el punto de vista de la fabricación, se han diseñado estas piezas para que su fabricación siga siendo sencilla a partir de chapa y soldadura o montaje por tornillos sin necesidad de operaciones de embutición ni mecanizados complejos.

El resultado de este diseño se ha denominado BN02,

Análisis cinemático y dinámico del segundo diseño

Para realizar el análisis se ha introducido una pieza ficticia que simula la carga a la que está sometido el sistema, se ha considerado una carga de 5kg.

Se ha simulado la trayectoria límite, o el contorno máximo que es capaz de abarcar el equipo y posteriormente se han analizado los datos obtenidos,



Figura 44: Diseño BN02

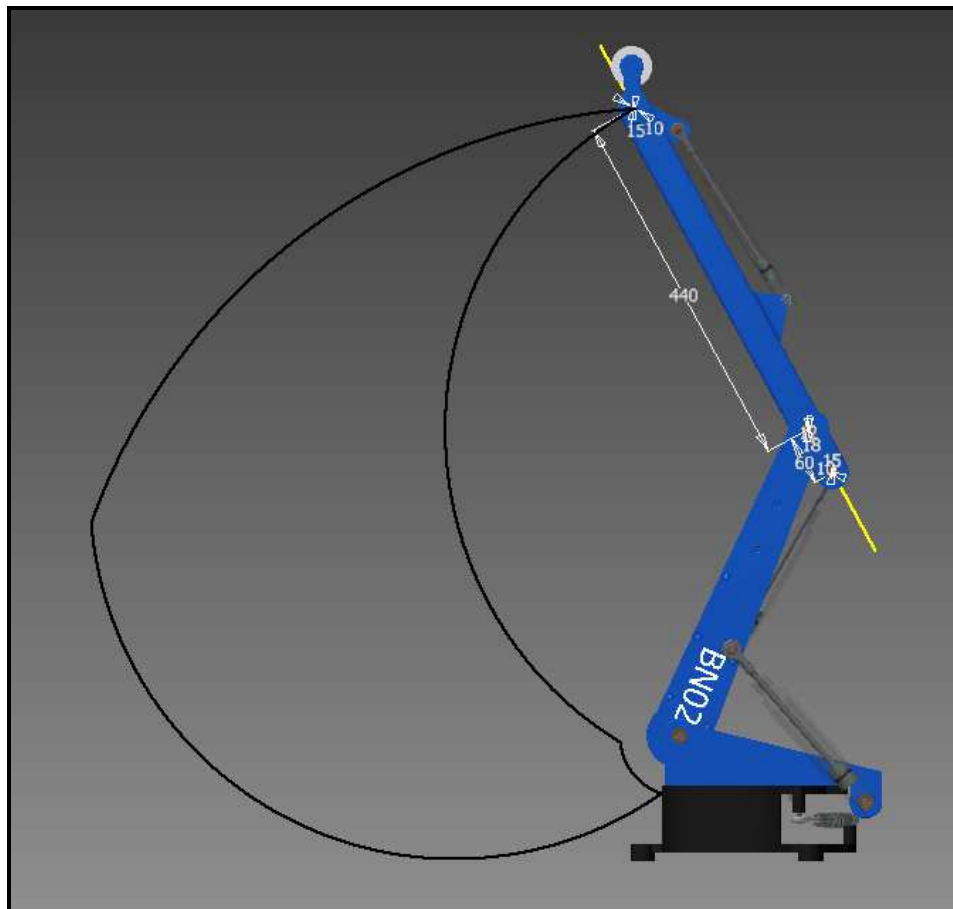


Figura 45: Trayectoria análisis BN02

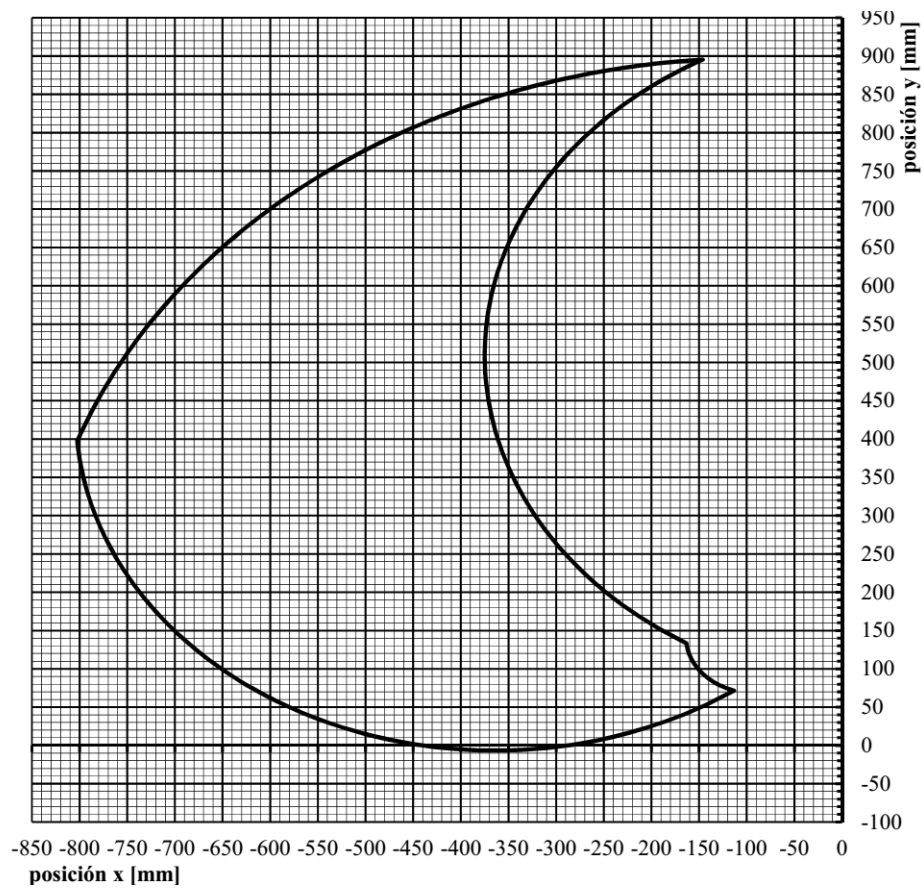


Figura 46: Trayectoria BN02

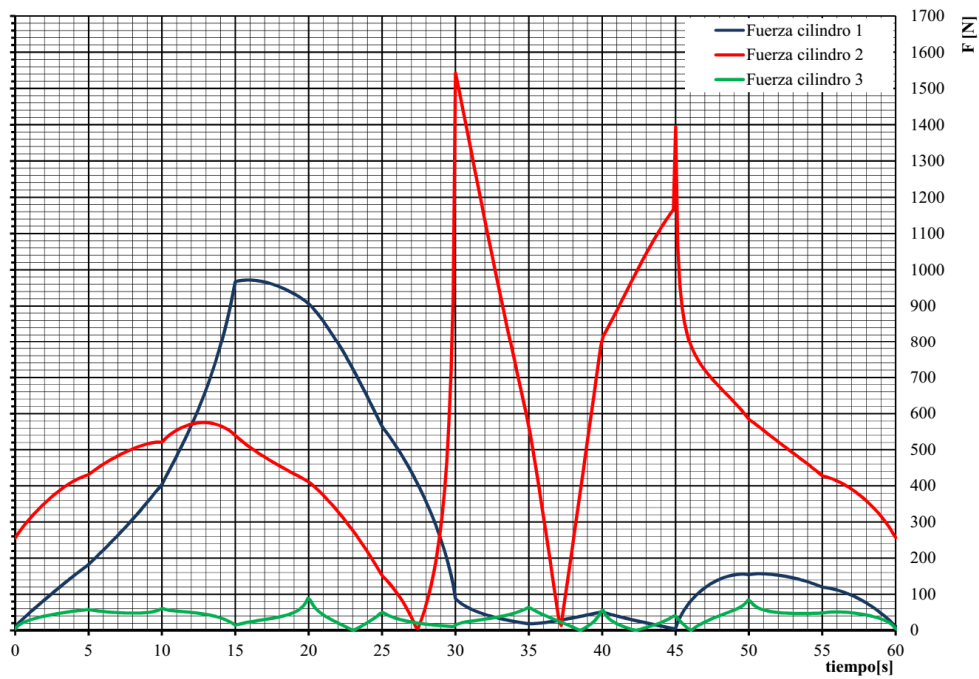


Figura 47: Fuerza en los cilindros BN02

4.2.4. Tercer diseño

Analizando los resultados obtenidos en el Apartado 4.2.3, ver Figura 50

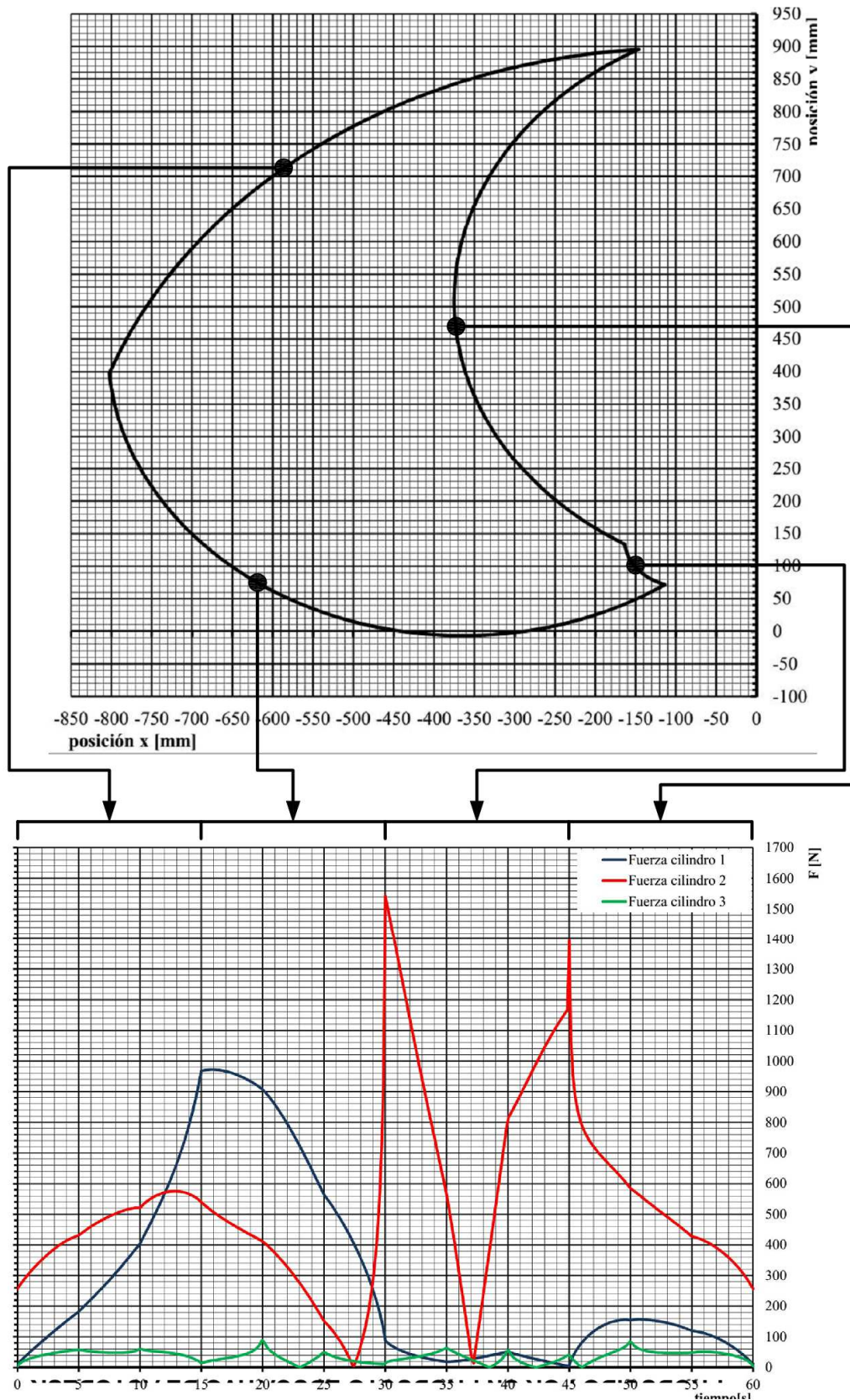


Figura 48: Fuerza en los cilindros por zonas de la trayectoria

Se observa que la fuerza necesaria en el cilindro 2 para poder mantener la trayectoria en algunas zonas es muy elevada y no es posible alcanzarla con los cilindros comerciales disponibles.

Se han realizado varias pruebas gracias a la posibilidad de cálculo que, nos ofrece el ordenador y la utilización del software CAE, y finalmente se ha optado por realizar las siguientes modificaciones,

- Primero hemos comparado nuestro diseño con otros diseños de brazo industrial analizados en el Apartado 2.2 y se ha observado que proporcionalmente la longitud del eslabón 2 con respecto al eslabón 1 de nuestro diseño es más pequeña, por lo que se ha decidido probar con una relación de longitudes mayor. Esto nos ha obligado a separar la posición de las articulaciones del eslabón fijo para aprovechar la longitud de carrera del cilindro 1

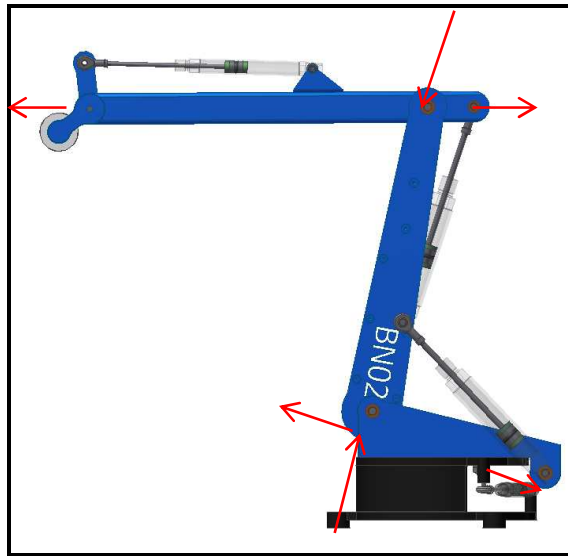


Figura 49: Modificaciones diseño BN02

- Se aumenta la distancia entre la articulación que une los eslabones 1 y 2 y la articulación que une el eslabón 2 con el cilindro 2 para aumentar el par que hace el cilindro 2 para girar el eslabón 2

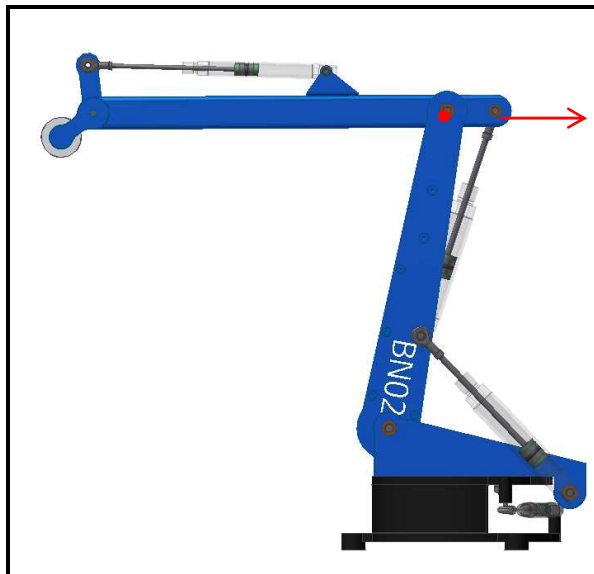


Figura 50: Modificaciones diseño BN02

- El cilindro 3 se desplaza fuera del plano del eslabón 3 y se aumenta la carrera del mismo para aumentar el ángulo de giro de la “muñeca” del brazo que era limitado,



Figura 51: Modificaciones diseño BN02

Después de varias pruebas y simulaciones realizadas con el programa CAD-CAE y de analizar los resultados se ha optado por el diseño que se ha denominado BN03



Figura 52: Modelo BN03



Figura 53: Sección transversal Modelo BN03

4.3. Resultados del diseño mecánico

4.3.1. Comparación entre los modelos BN02 Y BN03

Área de trabajo

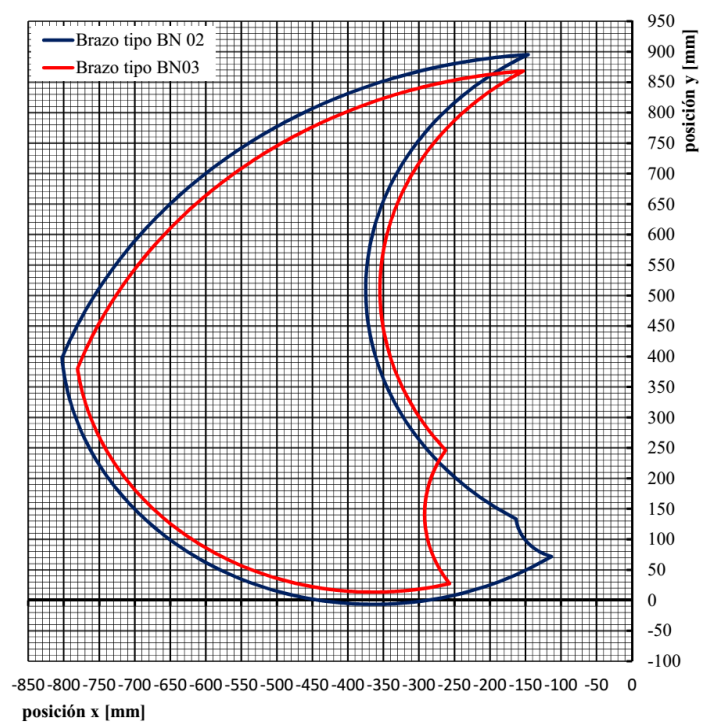


Figura 54: Comparación trayectoria BN02 y BN03

Observamos que el área de trabajo del modelo BN03 es similar al área de trabajo del modelo BN02 en el eje x, pero es ligeramente menor en el eje y.

Fuerza necesaria en los cilindros

Cilindro 1:

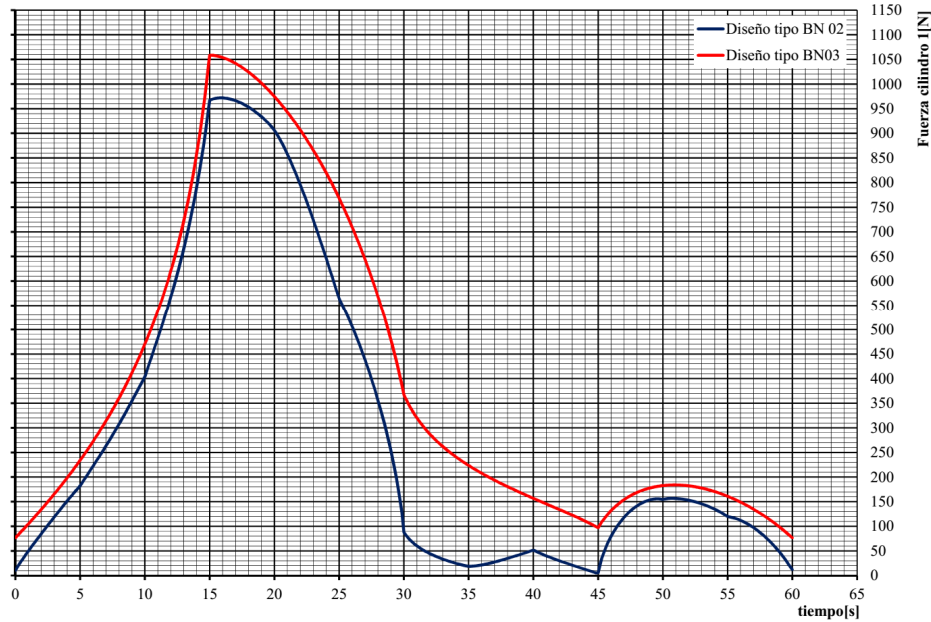


Figura 55: Comparación fuerza cilindro 1 BN02 y BN03

Se observa que la fuerza necesaria en el cilindro 1 es similar en ambos casos, la diferencia que se aprecia puede ser debido a que el modelo de pinza carga (pieza que simula la carga), que sea utilizado en este caso es más realista y sitúa el centro de gravedad de la masa en un punto más alejado del punto de articulación (muñeca) como ocurriría en el caso real.

Cilindro 2:

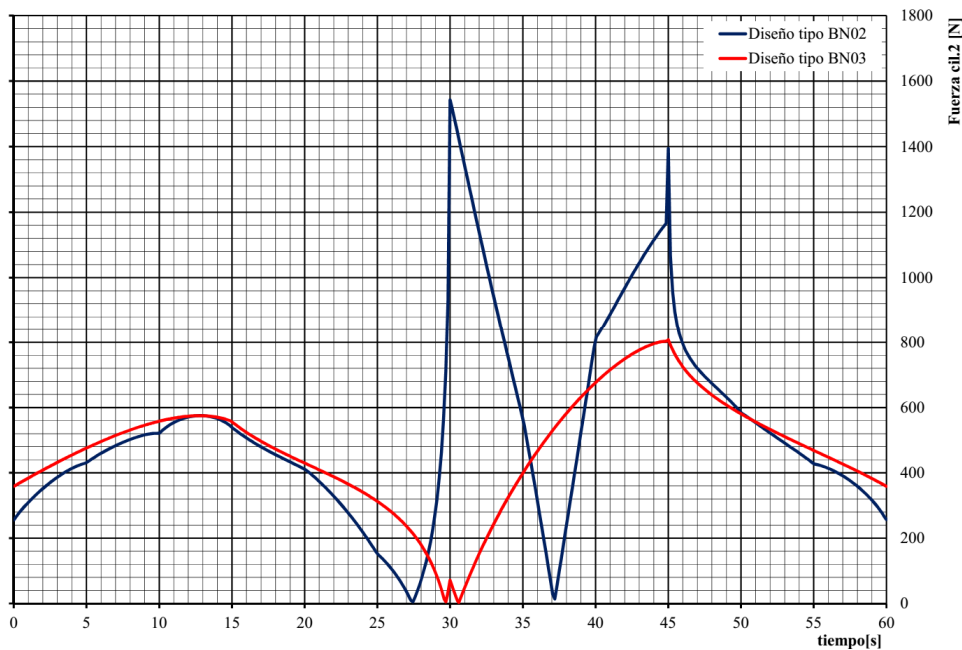


Figura 56: Comparación fuerza cilindro 2 BN02 y BN03

En este caso se observa una mejora importante que es lo que se pretendía con este diseño, se han reducido los picos de fuerza en este cilindro, y están por debajo de las fuerza necesaria en el cilindro 1 como es de esperar ya que en la posición del cilindro 1 tenemos dos cilindros reales mientras que en la posición del cilindro 2 sólo un cilindro real.

En cualquier caso existen ciertas posiciones dentro del área de trabajo que el mecanismo no conseguirá alcanzar con el límite de 10bar de presión y 5kg de carga. En este caso es necesario definir una carga menor en esas áreas de trabajo. En la Figura 59 se define el área de trabajo según la carga.

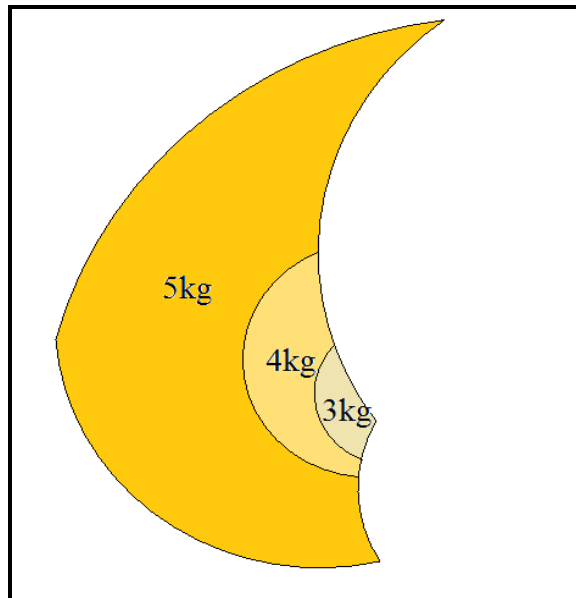


Figura 57: Área de trabajo según la carga

El diseño BN03 se considera satisfactorio y se van a obtener todos los datos relevantes del mismo para que ser tenidos en cuenta en el resto del diseño.

4.3.2. Área de trabajo

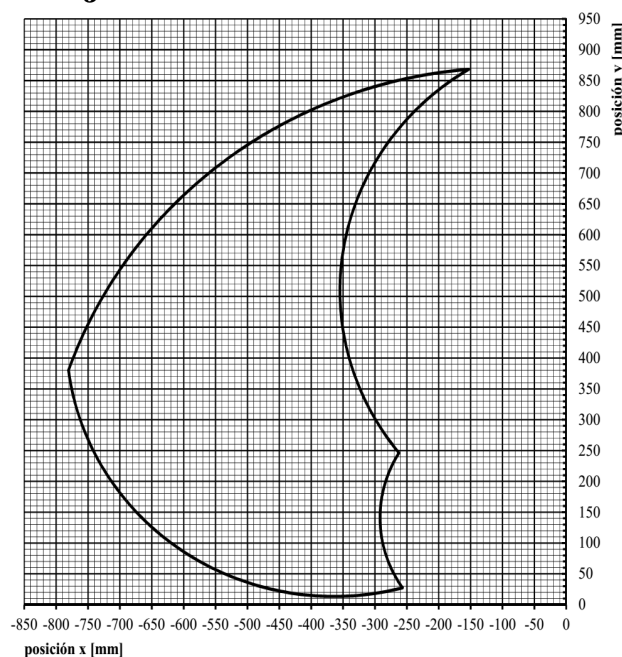


Figura 58: Área de trabajo BN03

4.3.3. Fuerza en los cilindros

Carga 5kg

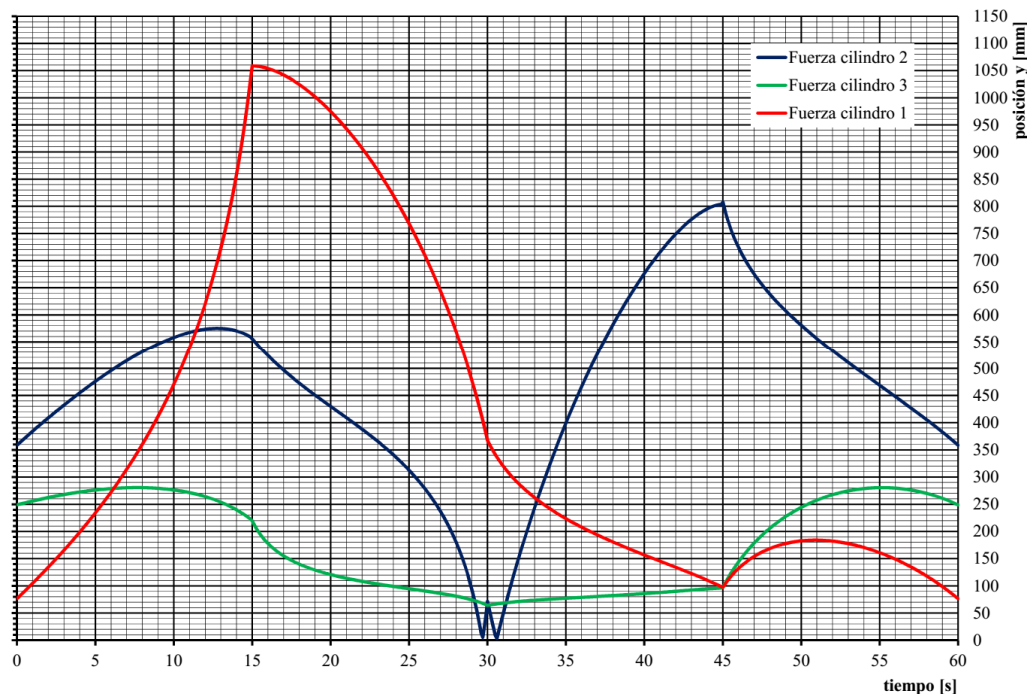


Figura 59: Fuerza en los cilindros BN03, carga 5 kg

Carga 4kg

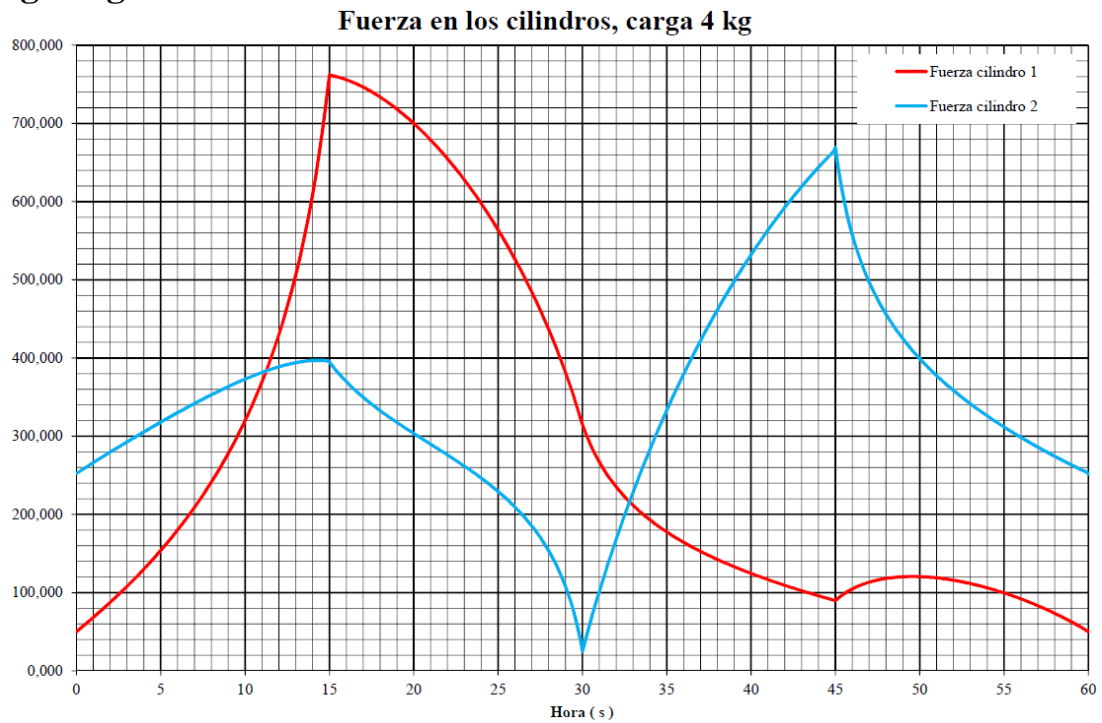


Figura 60: Fuerza en los cilindros BN03, carga 4 kg

Carga 3kg

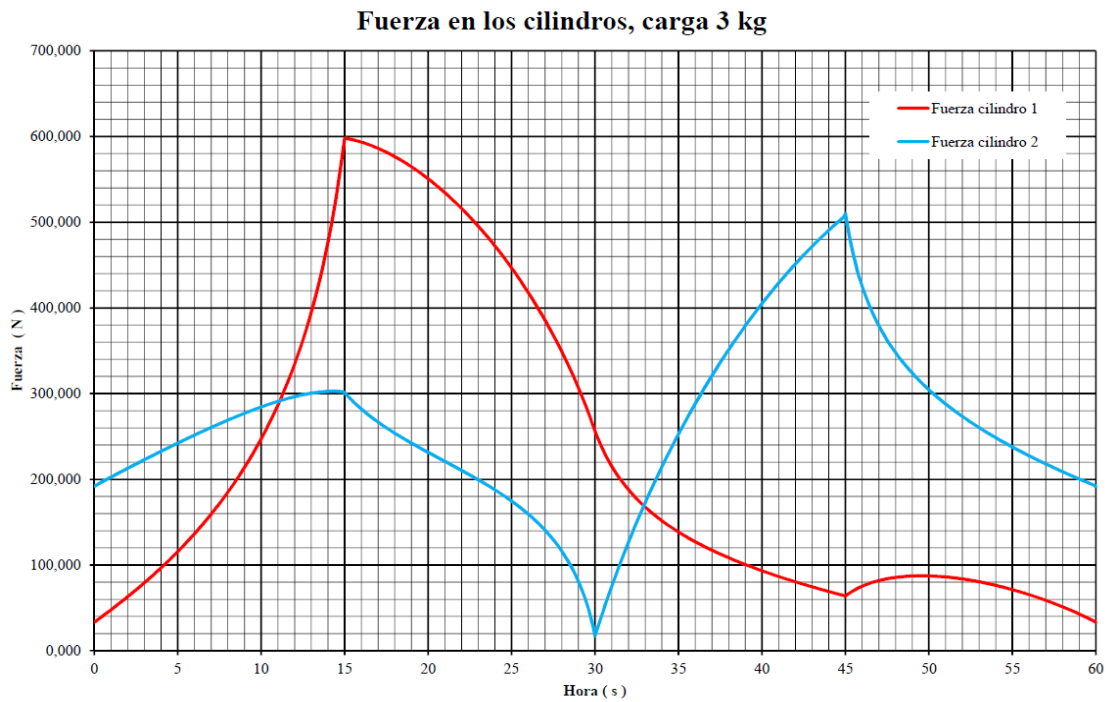


Figura 61: Fuerza en los cilindros BN03, carga 3 kg

Carga 2kg

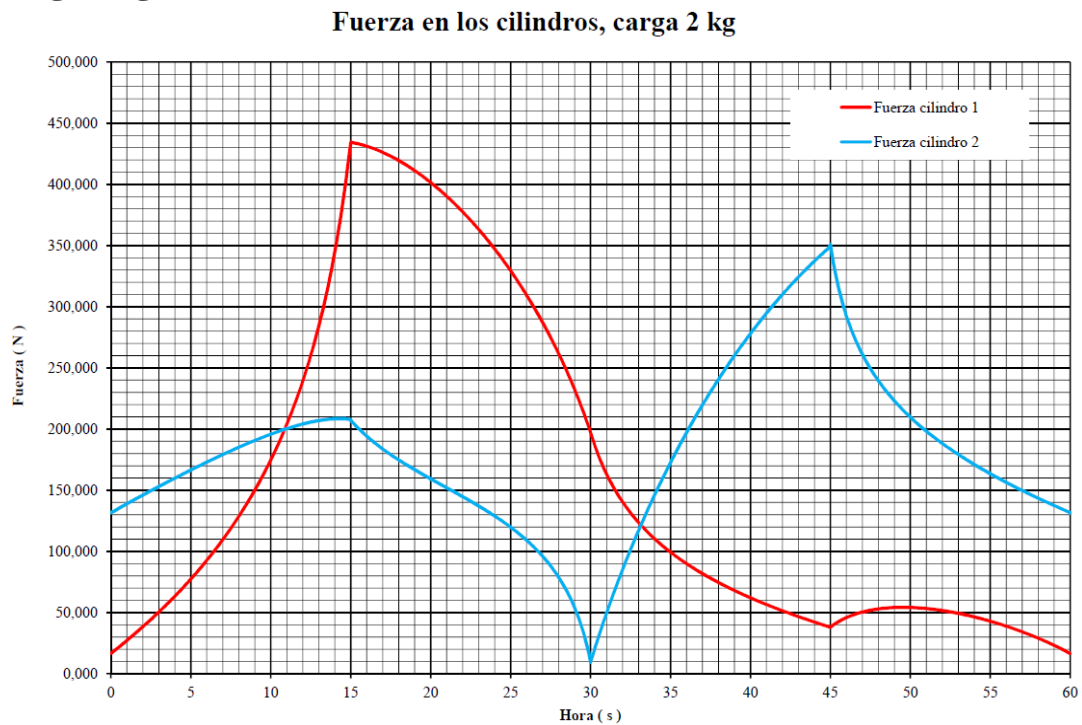


Figura 62: Fuerza en los cilindros BN03, carga 2 kg

4.3.4. Reacciones en los apoyos con carga de 5 kg

Reacciones en los apoyos

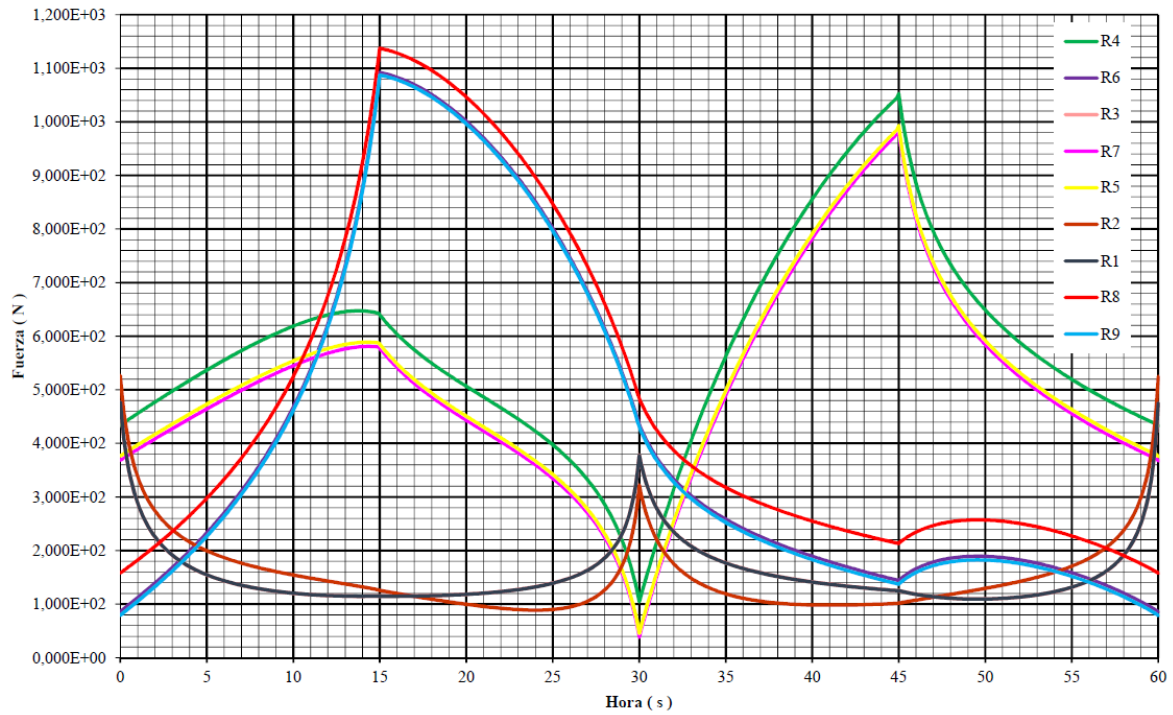


Figura 63: Reacciones en los apoyos

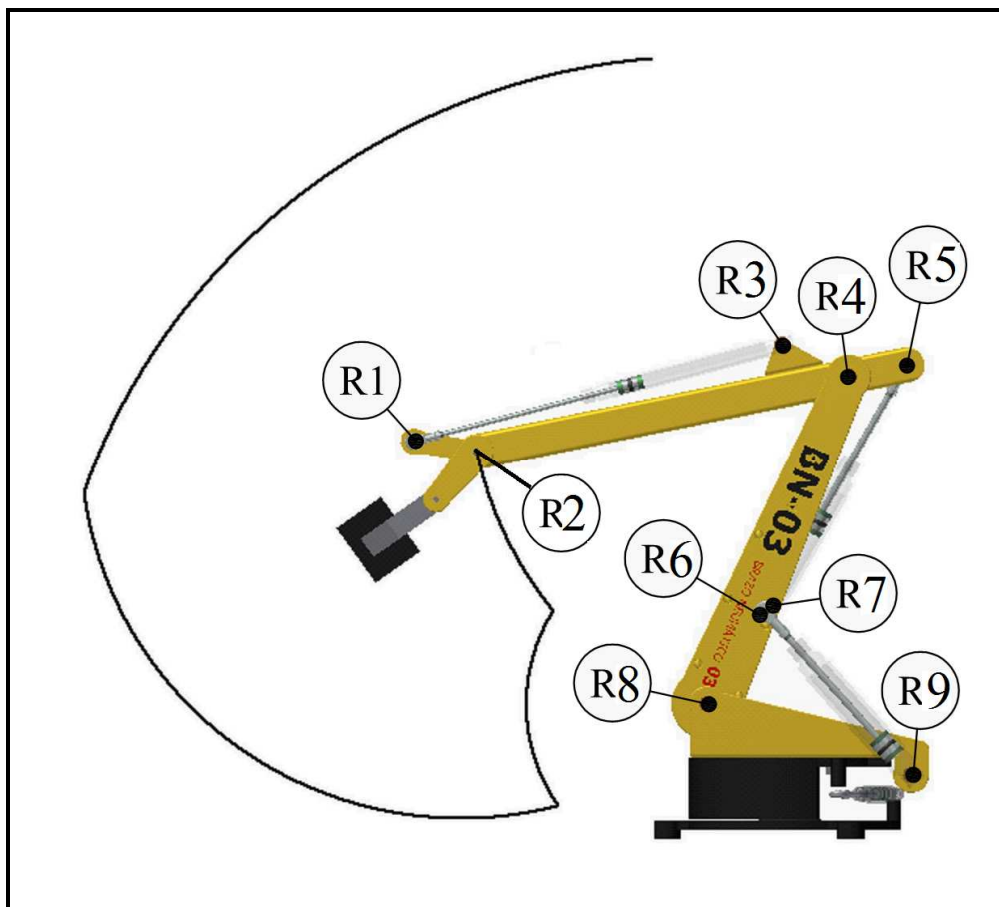


Figura 64: Numeración de los apoyos

Capítulo 5

Diseño neumático

En este capítulo se diseña el circuito neumático de nuestro equipo. Como se ha definido en el Apartado 2.3, nuestra instalación estará limitada a la presión máxima de 10 bar, ya que es una presión que se utiliza como estándar en la industria.

Los circuitos neumáticos son instalaciones que se emplean para generar, transmitir y transformar fuerzas y movimientos por medio del aire comprimido.

El esquema muestra las conexiones entre válvulas, actuadores y el resto de dispositivos descritos en el Apartado 2.3.1 según los símbolos normalizados en la norma ISO1219-1

El esquema neumático representa el circuito que sigue el aire con gráficos que representan de forma más o menos intuitiva los distintos elementos por los que circula el aire. En primer lugar se eleva la presión del aire y se acondiciona éste para su uso, después se pasa por distintas válvulas funcionales y de seguridad y finalmente se dirige al actuador que es el elemento que realiza el trabajo para el que ha sido diseñado el circuito. Posteriormente existen otras válvulas encargadas de dirigir el aire de nuevo a la atmósfera.

5.1. Esquema neumático

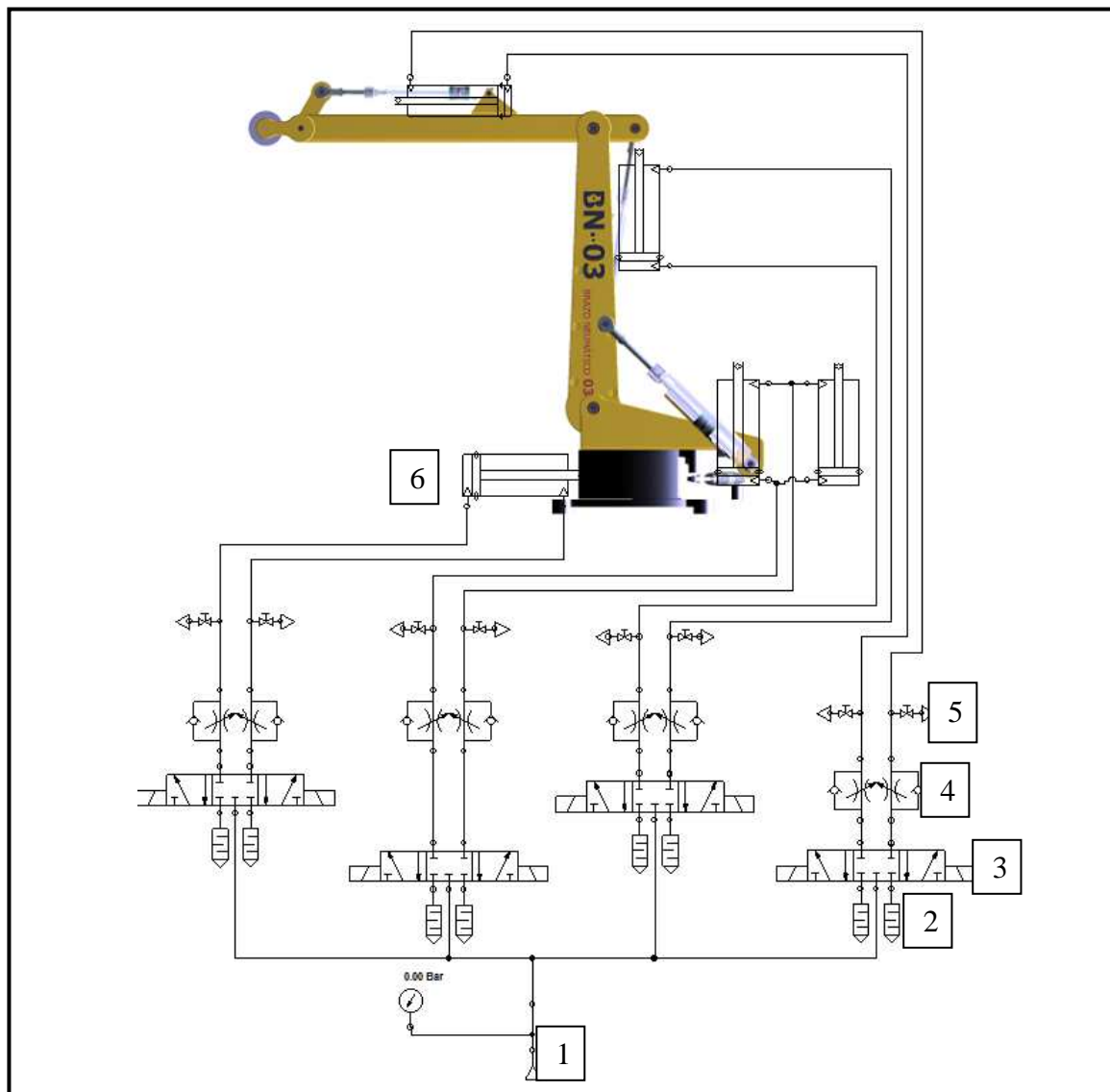


Figura 65: Esquema neumático

- El aire procede de una fuente de suministro representada por (1)
- Se reparte a las diferentes válvulas direccionales 5/3, representadas por (3). Cada uno de los recuadros del símbolo representa una posición de la válvula y cada una de las conexiones que llegan al recuadro central representa una as vía de la válvula, el recuadro del centro representa la posición de reposo.
- Los símbolos laterales representan los accionamientos, en este caso son eléctricos. Cuando un accionamiento está activado, la posición o estado de la válvula pasa a ser la representada por el recuadro más próximo al símbolo del accionamiento. Los símbolos en el interior de cada recuadro representan las conexiones entre vías que se dan para una posición dada, por ejemplo en la posición central, el aire se encontrará con la válvula cerrada en todas las vías.

- De esta forma permite la subida, bajada o frenado de su cilindro que está conectado a la válvula (6).
- Las válvulas reguladoras de caudal (4) permiten controlar el área de paso del aire en una dirección, permitiendo regular la velocidad de subida o bajada según la posición en la que están instaladas. Se han incluido unas válvulas de drenaje (5) que permiten descargar de aire el sistema en caso de que sea necesario recoger el mecanismo manualmente.
- Los silenciadores (2) permiten una salida del aire a la atmosfera de forma más silenciosa a como lo haría en el caso de escape libre, también pueden hacer de obturación en la línea en la que están conectados.

A continuación se representa un ejemplo del circuito que sigue el aire con dos válvulas activadas en posición de subida, las líneas rojas indican presión de trabajo y las azules presión atmosférica.

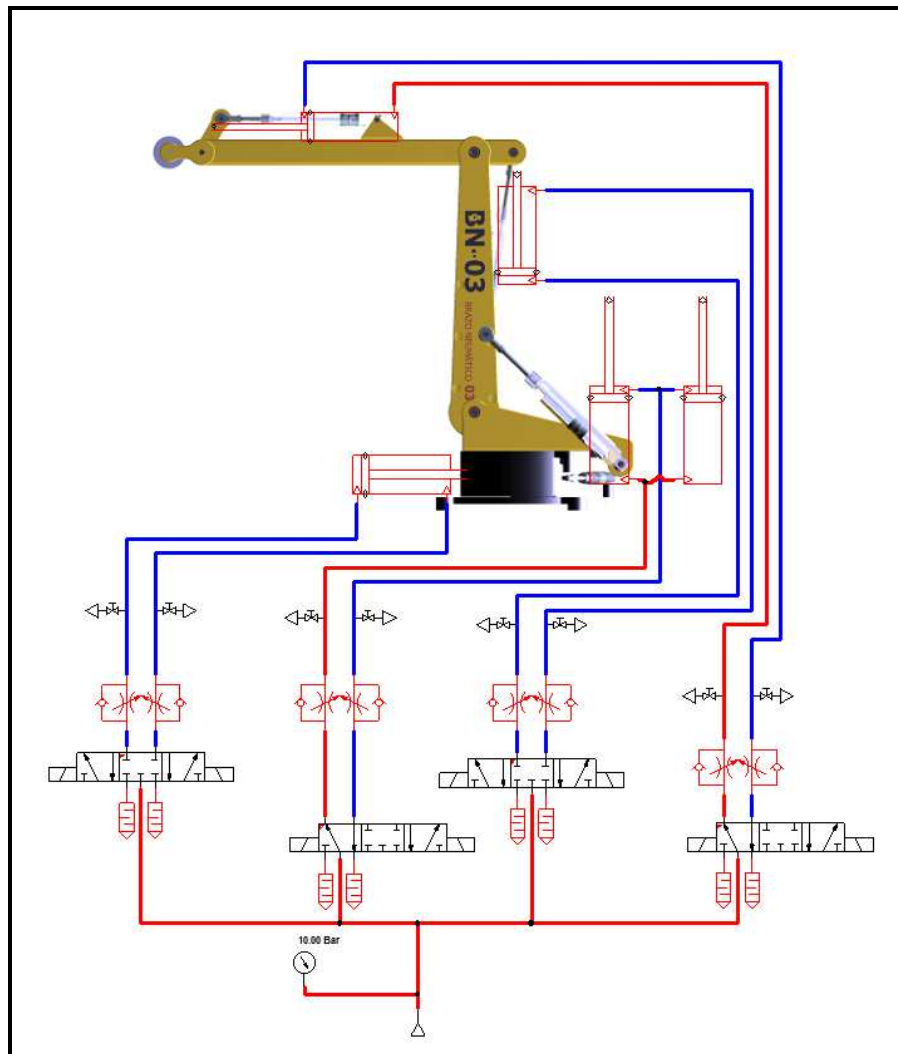


Figura 66: Esquema neumático con cilindros en fase de subida

En el siguiente ejemplo, las mismas válvulas pero accionadas en posición de descenso.

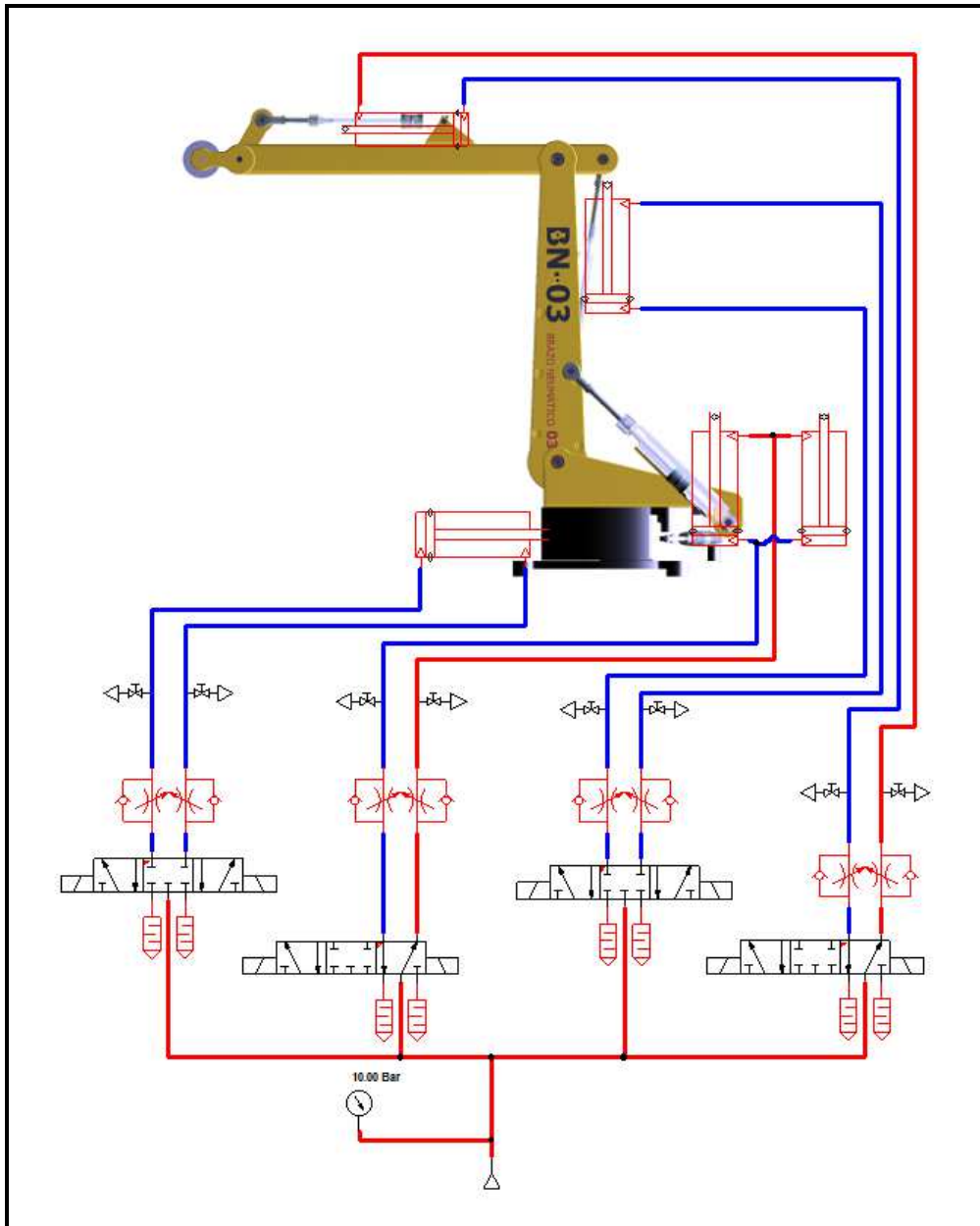


Figura 67: Esquema neumático con cilindros en fase de bajada

5.2. Instalación neumática sobre el equipo

En el estudio realizado en el Apartado 1.2.3 se ha observado la importancia que dan los fabricantes a colocar los tubos de conexiones neumáticas en zonas de fácil accesibilidad para reducir los tiempo de mantenimiento, cerca de los bordes del mecanismo. Se debe tener en cuenta esto para realizar el diseño de la instalación neumática.

La norma ISO 8573-1 define la calidad del aire que suministra a los equipos neumáticos. Las impurezas que prevé esta norma que puede tener el aire son:

- Partículas sólidas: Se contabilizan según el tamaño de la partícula y la concentración en ppm (partes por millón)

- Agua: En este caso se contabiliza la máxima cantidad de agua admisible según sus efectos en el punto de rocío del aire a partir de unas condiciones estándar de 20°C y 1atm de presión
- Aceites: Se contabiliza en ppm (partes por millón)

Clase	Partículas sólidas		Agua Punto de rocío (°C)	Aceite Concentración máxima (mg/m ³)
	Tamaño de la partícula (μm)	Concentración máxima (mg/m ³)		
1	0.1	0.1	-70	0.01
2	1	1	-40	0.1
3	5	5	-20	1
4	15	8	+3	5
5	40	10	+7	25
6	-	-	+10	-

Tabla 7: Norma ISO 8573-1

Se puede elegir una clase por cada uno de los elementos contaminantes de forma independiente. En nuestro caso exigimos una calidad del aire fácil de obtener en instalaciones industriales Clase 4-3-4 según ISO 8573-1.

5.3. Cálculo de los cilindros neumáticos

La instalación neumática será un límite para conseguir los esfuerzos necesarios para generar los movimientos en nuestro sistema.

La presión neumática máxima junto con la sección de los cilindros limita la fuerza máxima que pueden realizar los cilindros neumáticos. Hemos definido una presión de 10bar que es la presión típica de las instalaciones neumáticas industriales.

El caudal neumático máximo junto con la sección de los cilindros limitan la velocidad máxima de desplazamiento lineal de los cilindros, en este caso vamos a calcular el caudal teniendo en cuenta la potencia de trabajo de los robots analizados en el Apartado 2.2.

$$P = Q \cdot p$$

$$Q_{max} = \frac{P_{max}}{p_{max}}$$

$$Q_{max} = \frac{250W}{10^6 Pa} = 2.5 \cdot 10^{-4} m^3/s$$

$$v_{Qmax} = \frac{Q_{max}}{A_{cil}} = \frac{2.5 \cdot 10^{-4} m^3/s}{5 \cdot 10^{-4} m^2} = 0.5 m/s$$

$$F_{max} = p_{max} \cdot A_{cil}$$

Donde, P: Potencia

p: Presión

Q: caudal

Q_{max}: caudal máximo por cilindro

P_{max}: Potencia máxima de la instalación (compresor) dividida por el número de cilindros

p_{max}: Presión máxima de la instalación

v_{max}: velocidad máxima del cilindro

A_{cil}: Área del cilindro

F_{max}: Fuerza máxima que es capaz de realizar el cilindro

5.4. Resultados del diseño neumático

Inicialmente se han considerado cilindros de diámetro 10mm, ver Tabla 7,


	Area lado libre	Area lado de bástago	p	Fmax lado libre	Fmax lado de bástago
					
Cilindro 1	1.57 cm ²	1.32 cm ²	10bar	156N	132N
Cilindro 2	0.785 cm ²	0.66 cm ²	10bar	78N	66N
Cilindro 3	0.785 cm ²	0.66 cm ²	10bar	78N	66N

Tabla 8: Cálculo inicial de los cilindros neumáticos

Se observa que los valores obtenidos son muy inferiores a los requeridos, excepto en el caso del cilindro 3. Se decide cambiar los cilindros por otros de mayor sección el diámetro más grande disponible en la serie que estamos utilizando es 25mm.



	Area lado libre	Area lado de bástago	p	Fmax lado libre	Fmax lado de bástago
					
Cilindro 1	9.80 cm ²	8.25 cm ²	10bar	982 N	824 N
Cilindro 2	4.90 cm ²	4.12 cm ²	10bar	491 N	412 N
Cilindro 3	2.01 cm ²	1.73 cm ²	10bar	201 N	173 N

Tabla 9: Cálculo final de los cilindros neumáticos

5.4.1 Regulación de las válvulas de control de caudal

El software utilizado nos permite hacer un análisis de respuesta en el tiempo del sistema neumático.

Realizando ésta simulación, se ha observado una vibración que se produce en las arrancadas y paradas de los cilindros, se produce una oscilación en la presión neumática, que produce a su vez una vibración mecánica en los movimientos del vástago del cilindro.

Para solucionar este problema se han estudiado varias soluciones,

- Recurrir a la neumática proporcional, utilizando válvulas proporcionales reguladas electrónicamente, sin embargo esto es contrario a los principios que debe seguir nuestro diseño enunciados en el Apartado 1.2, sencillez y economía.
- Otra solución considerada ha sido la de utilizar de válvulas overcenter, que se ha comprobado que han sido utilizadas con éxito en el campo de la hidráulica pero en la neumática no está extendido su uso y apenas se ha encontrado información. En el apéndice se recoge información de un proveedor de estas válvulas, pero no es un tipo de válvula que recojan en catálogo los principales fabricantes de neumática.
- Finalmente, se ha observado que estas vibraciones se pueden reducir limitando el caudal de aire que entra en los cilindros mediante las válvulas reguladoras de caudal, en este apartado se han realizado varias simulaciones con distintas regulaciones en dichas válvulas para elegir la solución de compromiso óptima para nuestra aplicación. Disminuir el caudal reduce las vibraciones, pero también reduce la velocidad del sistema.

Para realizar las pruebas simuladas, estudiamos la subida del cilindro 2. Aplicamos la presión neumática máxima de 10 bar en la fuente de suministro de aire y activamos la válvula dirección de control del cilindro 2, antes de que llegue al final de su recorrido detenemos bruscamente el movimiento, llevando la electroválvula a la posición de reposo. La carga aplicada es 500N, que es prácticamente la carga máxima.

Se realizan pruebas con varias secciones de paso de aire en el regulador de subida del cilindro y se obtienen los resultados que se exponen a continuación.

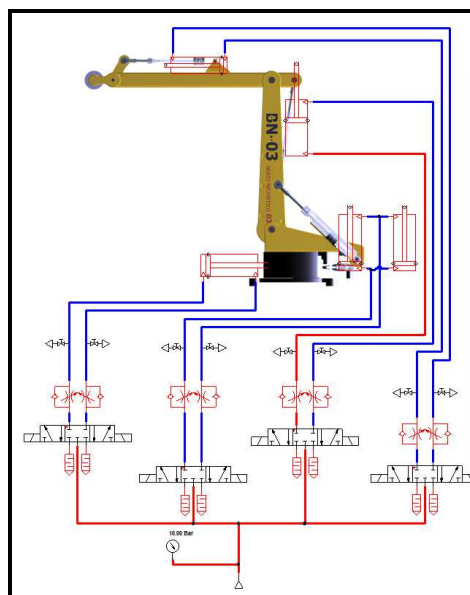


Figura 68: Esquema para el estudio de las vibraciones neumáticas

SECCIÓN DE PASO 0,7mm²

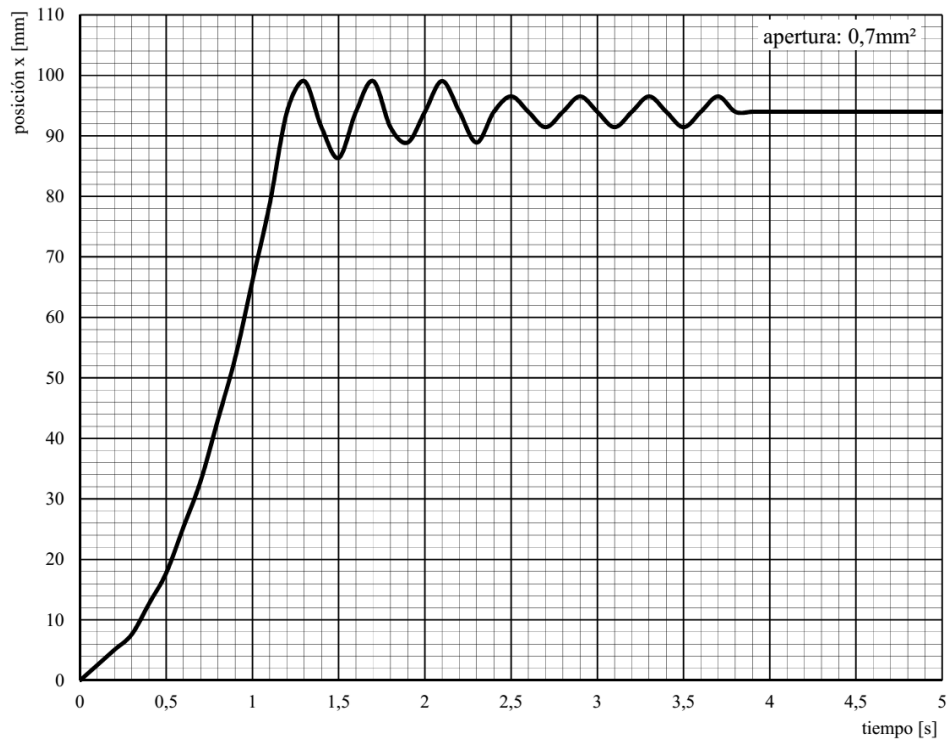


Figura 69: Oscilación neumática 1

La amplitud máxima de la oscilación es 15mm y la duración es aproximadamente 4s.

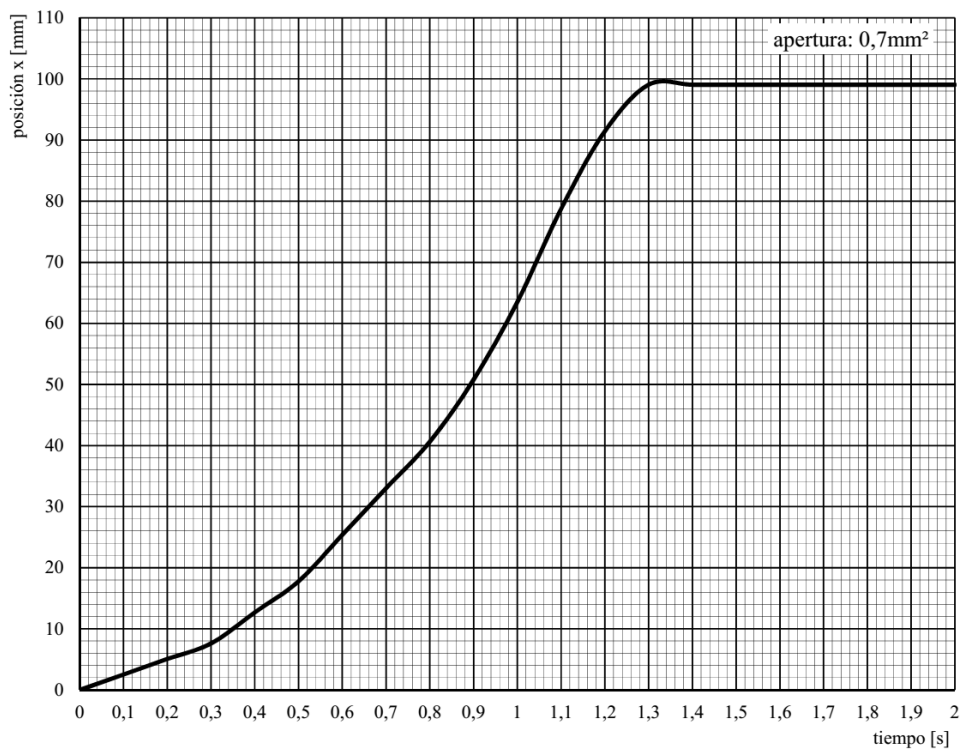
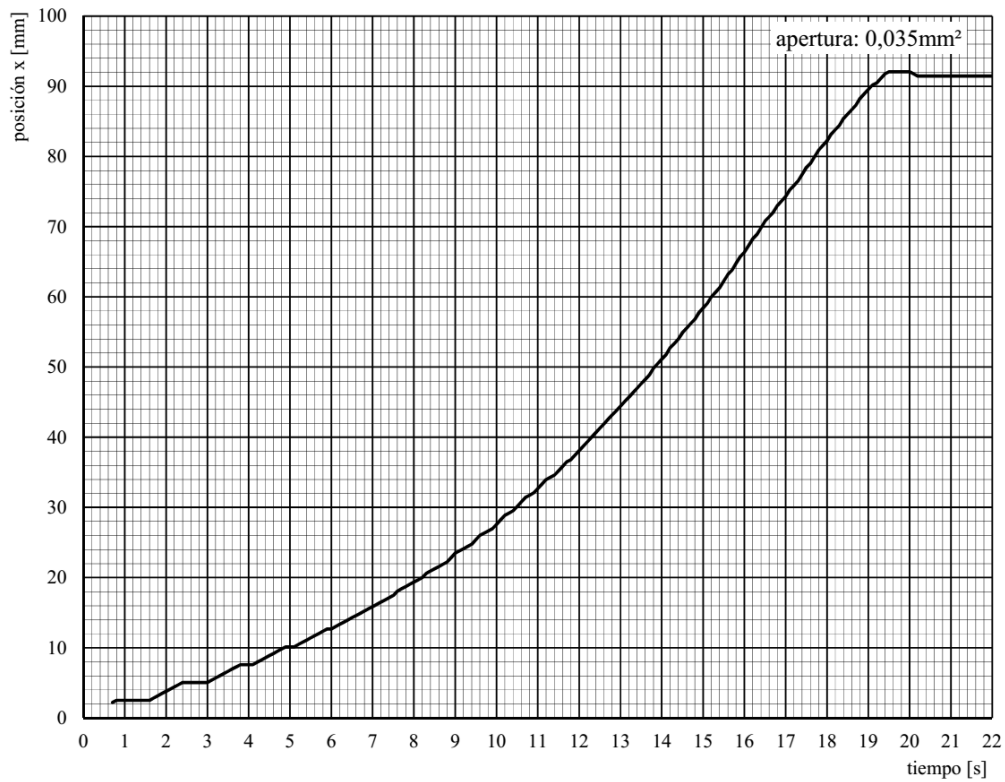
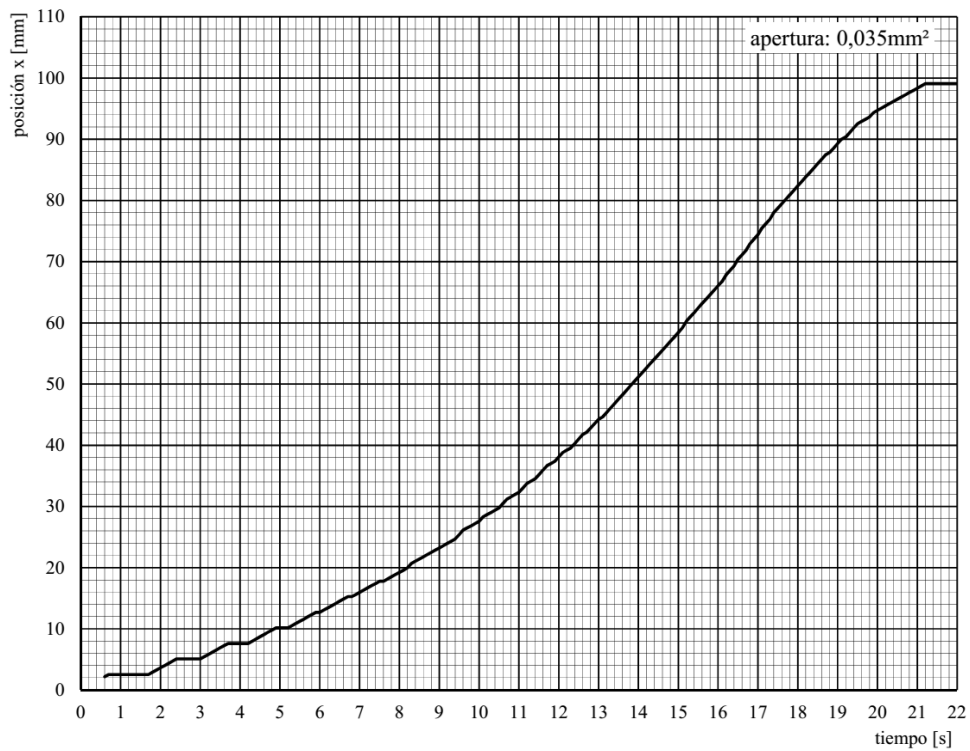


Figura 70: Tiempo de llenado 1

El tiempo de llenado del cilindro es aproximadamente 1,3s.

SECCIÓN DE PASO 0,035 mm²**Figura 71: Oscilación neumática 2**

La amplitud máxima de la oscilación y la duración son inapreciables.

**Figura 72: Tiempo de llenado 2**

El tiempo de llenado del cilindro es aproximadamente 21s., muy lento.

SECCIÓN DE PASO 0,14 mm²

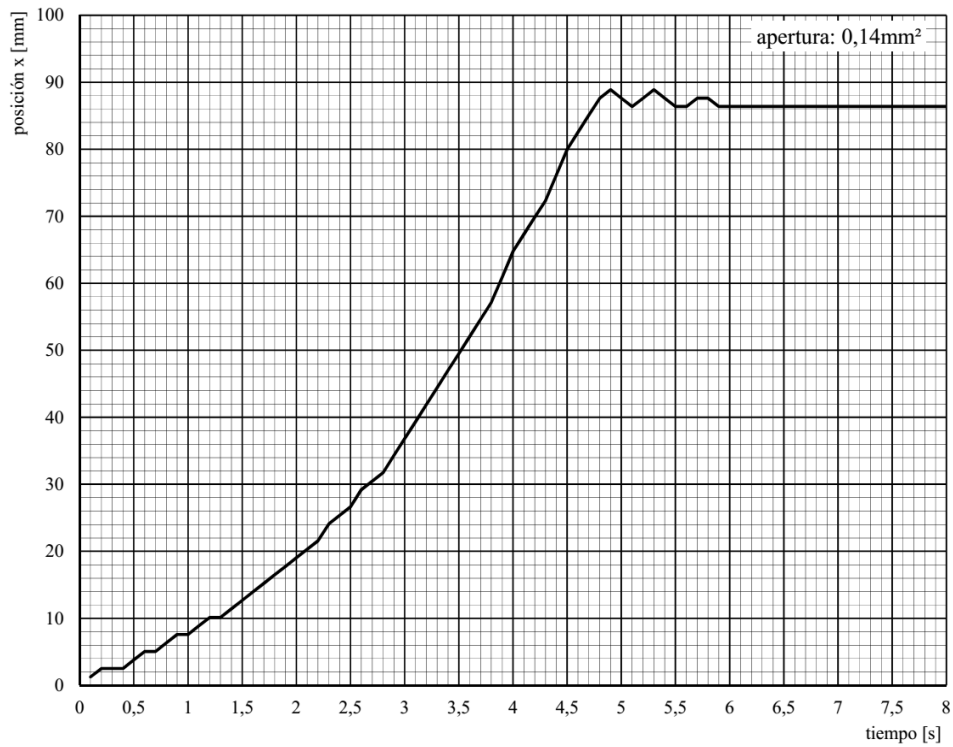


Figura 73: Oscilación neumática 3

La amplitud máxima de la oscilación es 3mm y la duración es aproximadamente 1.5s.

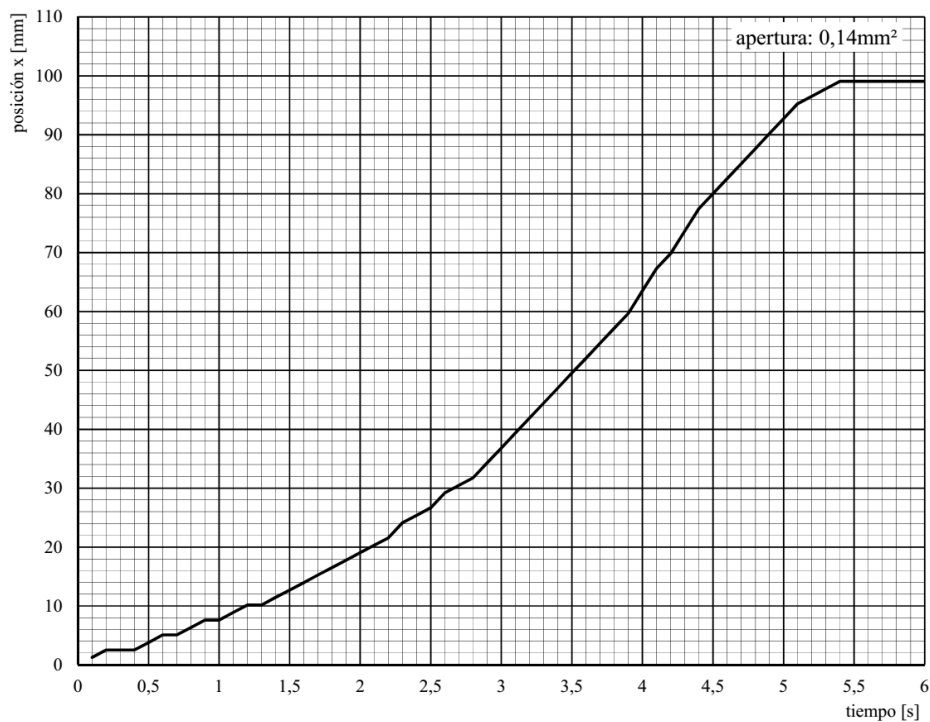


Figura 74: Tiempo de llenado 3

El tiempo de llenado del cilindro es aproximadamente 5.5s., la consideramos la apertura óptima.

Capítulo 6

Ingeniería de detalle

6.1. Lista de planos

En los Apartado 4 y Apartado 5 se ha desarrollado la ingeniería básica de nuestro diseño, en este apartado se recoge la ingeniería detalle que incluye la documentación de fabricación de los componentes del diseño.

Lista de planos

Referencia	Denominación	Edición
C0001	BRAZO NEUMÁTICO	00
C0002	ESLABÓN 0	00
C0003	ESLABÓN 1	00
C0004	ESLABÓN 2	00
C0005	ESLABÓN 3	00
P0001	BASE	00
P0002	CARCASA	00
P0003	APOYO	00
P0004	BULÓN	00
P0005	BULÓN	00

P0007	BARRA	00
P0008	BULÓN	00
P0009	EJE	00
P0010	BULÓN	00
P0011	BULÓN	00
P0012	BULÓN	00
P0013	BARRA	00

Tabla 10: Lista de planos

Los planos se recogen en el Apéndice 1.

6.1.1. Notas sobre los planos

En este apartado se recogen algunas notas aclaratorias acerca de la elaboración de los planos,

- Entalladura DIN 509, Es una entalladura que se realiza en los cambios de sección de los ejes y tiene dos funciones principales:
 - Sirve de desahogo para disminuir la concentración de tensiones que se produce en un cambio repentino de sección
 - Permite que el radio de curvatura siempre existente en el cambio de sección, debido por ejemplo al radio de la herramienta de mecanizado no interfiera con la esquina de la pieza que se monte sobre ella ya que su radio de curvatura podría ser menos que el radio de curvatura del alojamiento.

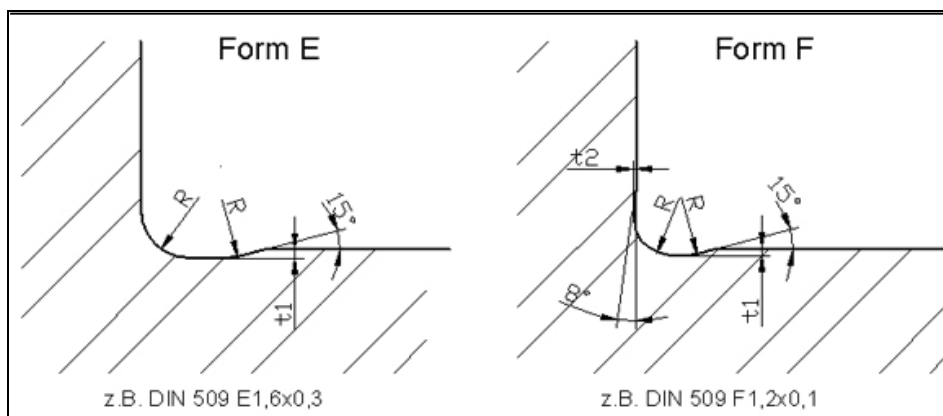


Figura 75: Entalladura DIN 509

- En las piezas en las que se prevé un desgaste por rozamiento con otra pieza se añade una nota de templado para endurecer la superficie de contacto, se comprueba también que el material es apto para la operación de temple.
- Salida de rosca DIN 76, es un mecanizado normalizado que se practica al final de algunas roscas que permite la salida de la herramienta de roscar dejando previendo

la forma de ésta e impidiendo que estos radios interfieran el montaje del tornillo sobre la pieza en la que va roscado.

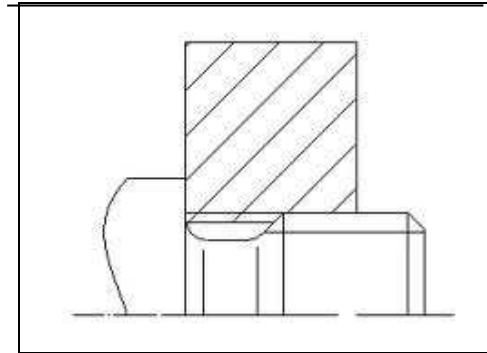


Figura 76: Salida de rosca

- Tolerancias geométricas: Se han utilizado las tolerancias de:
 - Oscilación radial: haciendo girar la pieza alrededor de un eje de referencia, la oscilación de la superficie cilíndrica no debe sobrepasar el límite marcado en la tolerancia.
 - Posición: La tolerancia limita las desviaciones de la posición del centro o eje del elemento controlado a partir de su verdadera posición, es decir, centro o eje del elemento de referencia.
 - Perpendicularidad: El elemento controlado puede ser una línea o un plano, la zona de tolerancia es la superficie entre dos líneas de referencia paralelas o el volumen entre dos planos. Definidos a partir de la línea o superficie de referencia y perpendiculares a ésta.
- Ajustes utilizados: se han seguido los siguientes criterios para realizar los planos,
 - m6/H7 en ejes – agujeros que una vez montados no queremos que giren, es necesario un mazo de goma o una prensa para su montaje.
 - j6 en ejes y M7 en agujeros para rodamientos, para su montaje es necesario un mazo de goma y utillaje especial o una prensa
 - f7 en ejes que queremos que giren una vez montados en sus cojinetes de teflón-bronce.
 - H8 en los alojamientos de los casquillos o cojinetes de teflón-bronce, éstos se montan con aprieto, es necesario mazo de goma o prensa.
 - c11/H9 en piezas que queremos montar con facilidad y no queremos tener problemas de tolerancias dimensionales para hacerlas encajar.

6.2. Elementos comerciales

6.2.1 Cojinetes sin lubricación

En las articulaciones se han dispuesto cojinetes para trabajar sin lubricación, de esta forma se reduce el coeficiente de fricción de la articulación y el desgaste de los componentes.

Sus características principales son:

Idóneo para trabajo en seco, libre de mantenimiento. También admite lubricación con aceite. No se recomienda lubricar con grasa.

Micro sección del cojinete:

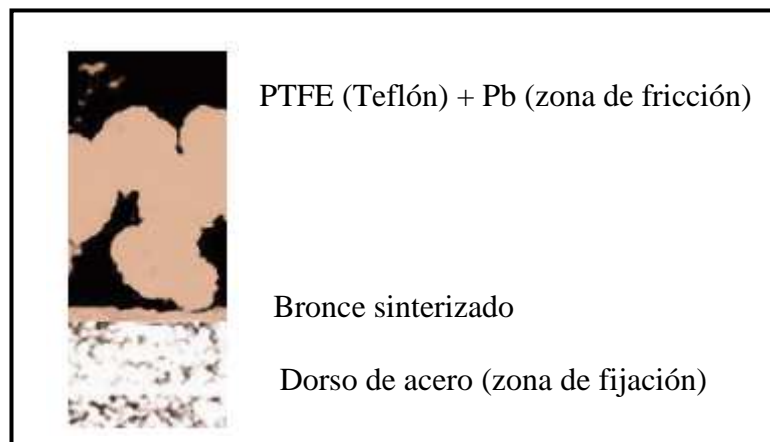


Figura 77: Micro sección de cojinete

Las especificaciones técnicas del componente son:

- Denominación: DU-B
- Rango de temperatura: -200 , +280°C
- Velocidad máxima: 2.5 m/s
- Carga estática: 250 N/mm²
- Carga dinámica: 140 N/mm²
- Factor PV: 1.8 N/mm²·m/s
- Coeficiente de fricción: 0.02 a 0.25
- Condiciones operativas:
- Seco: Muy bueno
- Aceite: Bueno
- Grasa: No recomendado
- Agua: Bueno
- Fluidos: No recomendado

6.2.2. Cabezas de articulación

Las cabezas de articulación seleccionadas se fabrican según la norma DIN648 serie K, tienen rosca hembra para poder montarse sobre los cilindros.

Son libres de mantenimiento y como se puede observar en la figura permiten el montaje con un error en el ángulo "1".

La superficie de fricción es de acero-bronce.

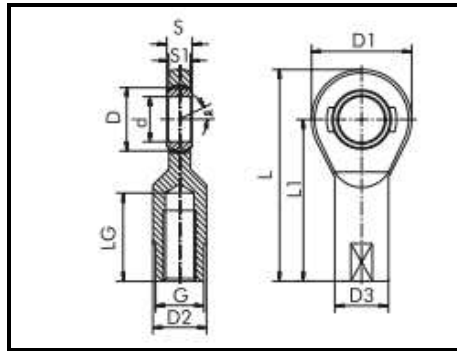


Figura 78: cabeza de articulación

6.2.3. Cilindros neumáticos

Los cilindros seleccionados pertenecen a la serie C85 del fabricante SMC, uno de los fabricantes líderes de productos neumáticos a nivel mundial.



Worldwide leading experts in pneumatics

Figura 79: Cilindro neumático

La serie C85 cumple la ISO 6432 y CETOP RP52P. La serie C85 está disponible en diámetros de 8 mm a 25 mm con carreras estándar que oscilan entre 10 mm y 300 mm. El diseño único de la junta rascadora evita la entrada de polvo y la efectividad del sellado es tal que la serie C85 es apropiada para su uso en ambientes extremadamente polvorientos. Con los embalajes contra el deterioro y las juntas de extremo, la serie C85 ofrece una duración de vida excepcional.

Las especificaciones técnicas del componente son:

- Función: Doble efecto
- Fluido: Aire
- Presión de prueba: 15bar
- Presión de trabajo máxima: 10bar
- Temperatura (ambiente y fluido): -20°C , +80°C
- Lubricación: no requerida
- Velocidad: 50 , 1500 mm/s

Capítulo 7

Presupuesto

Se ha desarrollado un presupuesto del coste que supone la realización de este proyecto. Este presupuesto se desarrollará en el Apartado 7.1.

También se ha desarrollado una estimación de los costes de fabricación del equipo diseñado, para ello se han desglosado los subconjuntos y piezas para calcular el coste de cada una de ellas en cinco conceptos. Montaje, soldadura, plegado, corte y mecanizado y coste de compra de elemento comercial. Dentro de los conceptos de corte y mecanizado o plegado, se incluye el coste de la materia prima, es decir del material con que está realizada la pieza. El presupuesto se recoge en el Apartado 7.2.

Se ha realizado un diagrama de Gantt de la elaboración de este proyecto que se recoge en el Apartado 7.3

7.1. Presupuesto del proyecto

El presupuesto de los costes que suponen la realización del proyecto se ha dividido en siete conceptos, también se ha realizado un diagrama de Gantt para controlar los plazos de realización del proyecto y asignar un plazo a cada una de las tareas del mismo. Las tareas responden principalmente a las definidas en el diagrama de procesos recogido en la Figura 33, aunque se añade la tarea de realización de la presente memoria del proyecto, no recogida en dicho diagrama.

Concepto		Coste unitario	horas	Coste total
Licencia de software Autodesk Inventor		7.78 €/hora	320	2489.6
Licencia de software Automation Studio		70.01 €/hora	10	700.1
Ingeniería básica	Definición de especificaciones técnicas	29 €/hora	40	1160
	Elaboración del diseño básico	29 €/hora	120	3480
	Elaboración del diseño definitivo	17 €/hora	80	1360
Ingeniería de detalle	Elaboración de planos	17 €/hora	120	2040
Gastos generales Estimación 10%				1122.97
Total				12352.67 €

Tabla 11: Presupuesto del proyecto

Para la estimación de los costes unitarios se han realizado las siguientes hipótesis,

Coste de licencia / (factor de utilización * horas de trabajo por años)

Licencia de software Autodesk Inventor,

$10000 \text{ €} / (0.75 * 1714) = 7.68\text{€}$

Licencia de software Automation Studio,

$6000 \text{ €} / (0.05 * 1714) = 70.01\text{€}$

Para estimar otros costes generales a falta de otros datos más precisos se ha estimado que los costes aplicables a este concepto son un 10 % de los costes totales.

7.2. Presupuesto del proyecto

Según las fuentes consultadas el precio de venta de un robot comercial de características equivalentes a los analizados en el Apartado 2.2 es muy superior a este coste de fabricación. En la página de internet www.trendrobotics.com encontramos un precio de venta de robot ABB IRB 140 de 48.000 \$, es decir, 35.300 €.

También es posible encontrar este tipo de robot de segunda mano, en la página web www.robotsltd.co.uk encontramos un precio de 12.000 € para el mismo tipo de robot.

A pesar de que los robots comerciales son productos de mercado completamente acabados y funcionales, con toda la electrónica necesaria para el control preciso de los mismos y nuestro diseño cumple unas características mucho más básicas.

PRESUPUESTO BRAZO ROBÓTICO NEUMÁTICO										
CONJ	CTDAD	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN	MONT	SOLD	PLEG	C/M	COM	C/U	COSTE (€)
C0001	1			160					160	160
	3	DIN 471 - 6x0.7	Anillas de retención para el eje					1	1	3
	2	SMC C-85-N16-100S	CILINDRO Ø16 x 100					21	21	42
	1	C0005	ESLABÓN 3					-	-	
	1	C0004	ESLABÓN 2					-	-	
	6	SMC C-85-N25-100S	CILINDRO Ø25 x 100					28	28	168
	8	DIN 471 - 8x0.8	Anillas de retención para el eje					1	1	8
	5	DIN 471 - 10x1	Anillas de retención para el eje					1	1	5
	1	C0003	ESLABÓN 1					-	-	
	2	SMC C-85-N25-50S	CILINDRO Ø25 x 50					27	27	54
	1	C0002	ESLABÓN 0					-	-	
	2	DIN 933 - M8 x 12	Perno de cabeza-hex					1,5	1,5	3
C0002	1			5					5	5
	1	P0001	BASE				60		60	60
	1	TIMKEN 32205	RODAMIENTO RODILLOS CÓNICOS					26	26	26
	1	EPIDOR BB0810DU	COJINETE SIN LUBRICACIÓN					5	5	5
C0003	1			7					7	7
	3	DIN 912 - M10 x 30	Tornillo de cabeza cilíndrica					0,5	0,5	1,5
	3	DIN 127 - A 10	Arandela de presión					1	1	3
	2	DIN 125 - A 10.5	Arandela					0,2	0,2	0,4
	2	DIN 934 - M10	Tuerca hexagonal					0,4	0,4	0,8
	1	TIMKEN 32205	RODAMIENTO RODILLOS CÓNICOS					26	26	26
	1	P0005	BULÓN					14	14	14
	4	EPIDOR BB1017DU	COJINETE SIN LUBRICACIÓN				12	5,5	17,5	70
	1	P0002	CARCASA		40	15	45		100	100
	1	P0003	APOYO		50	70	42		162	162
	1	P0004	BULÓN				12		12	12
C0004	1			6					6	6
	1	P0007	VIGA	8	60	55	60		183	183
	10	DIN 7991 - M5 x 10	Tornillo avellanado					0,4	0,4	4
	1	P0010	BULÓN				10		10	10
	8	EPIDOR BB1017DU	COJINETE SIN LUBRICACIÓN					5,5	5,5	44
	1	P0009	EJE				8		8	8
	2	DIN 7991 - M6 x 40	Tornillo avellanado					0,4	0,4	0,8
	2	P0008	BULÓN				12		12	24
C0005	1			5					5	5
	1	P0013	VIGA		60		100		160	160
	1	P0011	BULÓN				10		10	10
	4	EPIDOR BB0810DU	COJINETE SIN LUBRICACIÓN					5	5	20
	4	EPIDOR BB1009DU	COJINETE SIN LUBRICACIÓN					5,5	5,5	22
	1	P0012	BULÓN				12		12	12
COSTE										1444,5
GASTO GENERALES										144,45
COSTE TOTAL										1588,95

Abreviaturas

CONJ	Conjunto
CTDAD	Cantidad
MONT	Montaje
SOLD	Soldadura
PLEG	Plegado (incluye material en bruto)
C/M	Corte o mecanizado (incluye material en bruto)
COM	Comercial
C/U	Coste unitario
-	Coste desglosado posteriormente

Tabla 12: Presupuesto de fabricación

Los datos analizados permiten considerar esta opción como económicamente viable para su utilización en aplicaciones sencillas, ya que el margen de presupuesto aún es muy elevado.

En la Figura 80 se presenta el diagrama de Gantt del proyecto, se observa un retraso de cuatro semanas respecto a lo planificado.

Una posible razón de este retraso es que se han tenido que realizar dos diseños ya que el primero no fue satisfactorio. Una posible razón de este retraso es que se han tenido que realizar dos diseños ya que el primero no fue satisfactorio.

7.3. Diagrama de Gantt

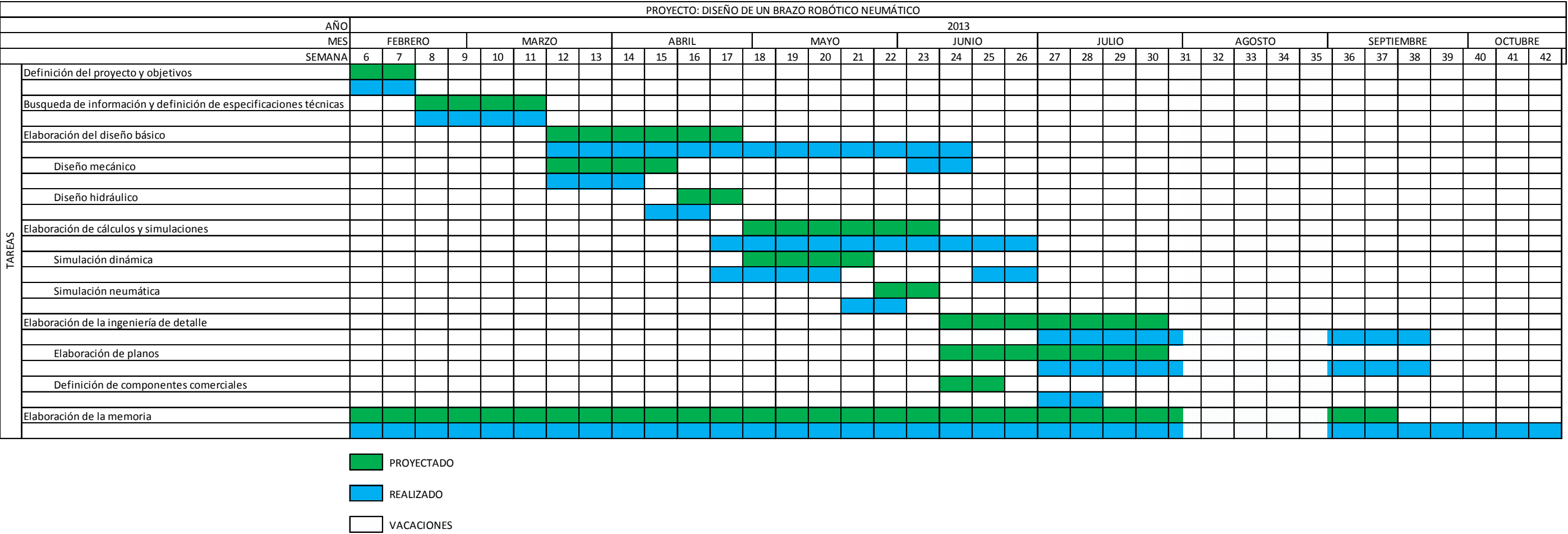


Figura 82: Diagrama de Gantt realizado

Capítulo 8

Ejemplos de aplicaciones

Se han desarrollado varias aplicaciones prácticas a modo de ejemplo para ilustrar de la forma más gráfica posible, los conceptos que se han desarrollado a lo largo de todo el diseño.

Los ejemplos típicos de aplicación que se han considerado son: transporte, pintura, soldadura.

La herramienta de diseño CAD-CAE, nos permite calcular la trayectoria que queremos que siga la pinza y en base a esta trayectoria calcular las posiciones de los cilindros.

También nos permite calcular la fuerza necesaria en los cilindros lo que nos permite determinar si nuestra instalación puede realizar el trabajo requerido.

También es posible calcular la velocidad de los cilindros, lo que nos permite calcular junto con la fuerza la potencia necesaria en nuestra instalación y la energía consumida.

8.1. Aplicación transporte

La aplicación típica de transporte consiste en trasladar un elemento de la cadena productiva de un punto a otro dentro del área de trabajo de la máquina. El elemento está caracterizado por una determinada masa y una determinada geometría. Ambos parámetros deben ser tales que no excedan la capacidad máxima del equipo.

En la simulación obtenemos todos los datos de fuerzas velocidades, etc. Que nos permiten determinar si nuestra máquina es capaz de realizar el trabajo propuesto.

En este ejemplo analizamos el traslado de material desde un punto “A” hasta otro punto “B” elegidos aleatoriamente dentro del volumen de trabajo del robot. Podemos simular distintas trayectorias, distintas velocidades y aceleraciones, para definir la forma óptima de realizar el recorrido con el robot diseñado.

En esta aplicación la simulación nos permite calcular la trayectoria que ha de seguir los cilindros, lo que nos ayuda para programar sus movimientos.

También nos sirve para calcular los esfuerzos necesarios, así podemos calcular si con nuestra instalación podemos realizar este trabajo.

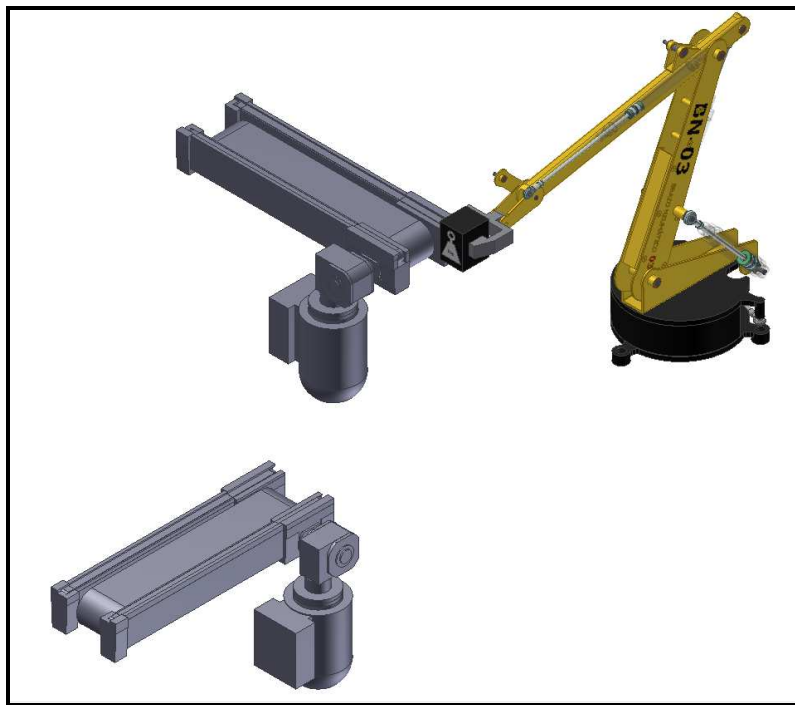


Figura 81: Aplicación transporte

En la Figura 82 y Figura 83 se presenta la fuerza necesaria en los cilindros y la posición de los mismos.

La Figura 84 presenta la velocidad de los cilindros. A partir de estos datos se puede calcular la potencia desarrollada por la máquina y la energía consumida.

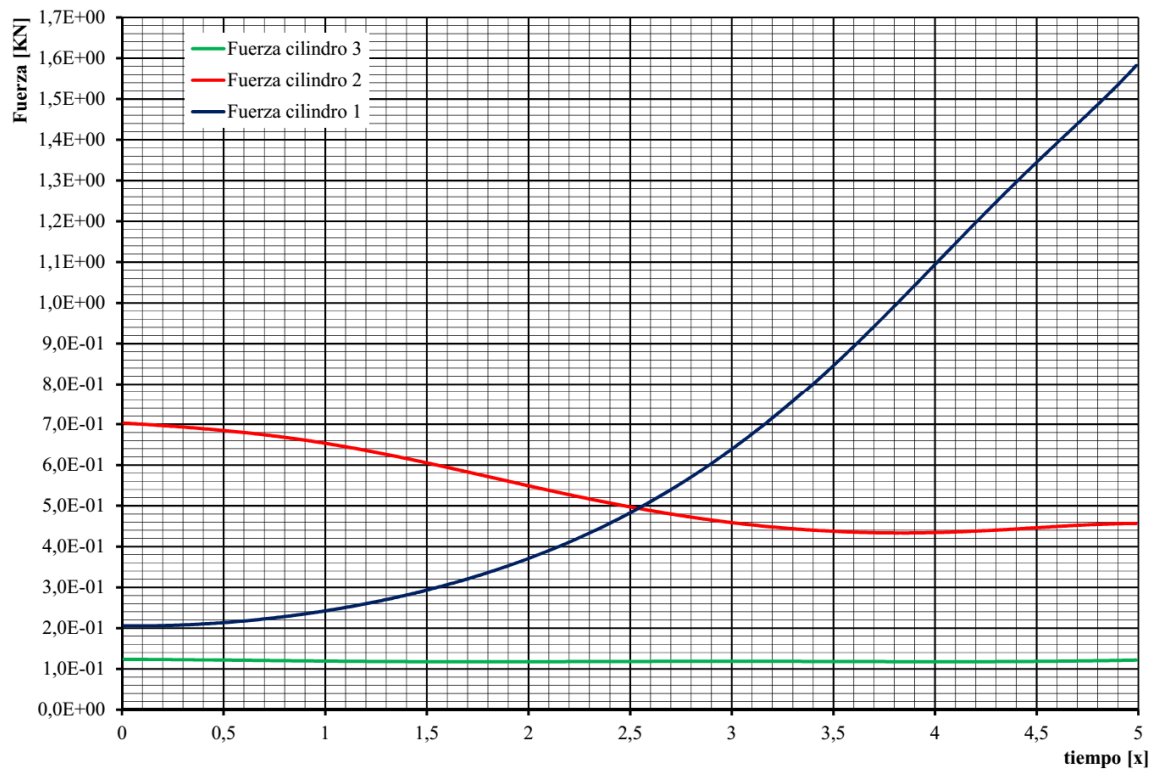


Figura 82: Fuerzas en los cilindros, aplicación transporte

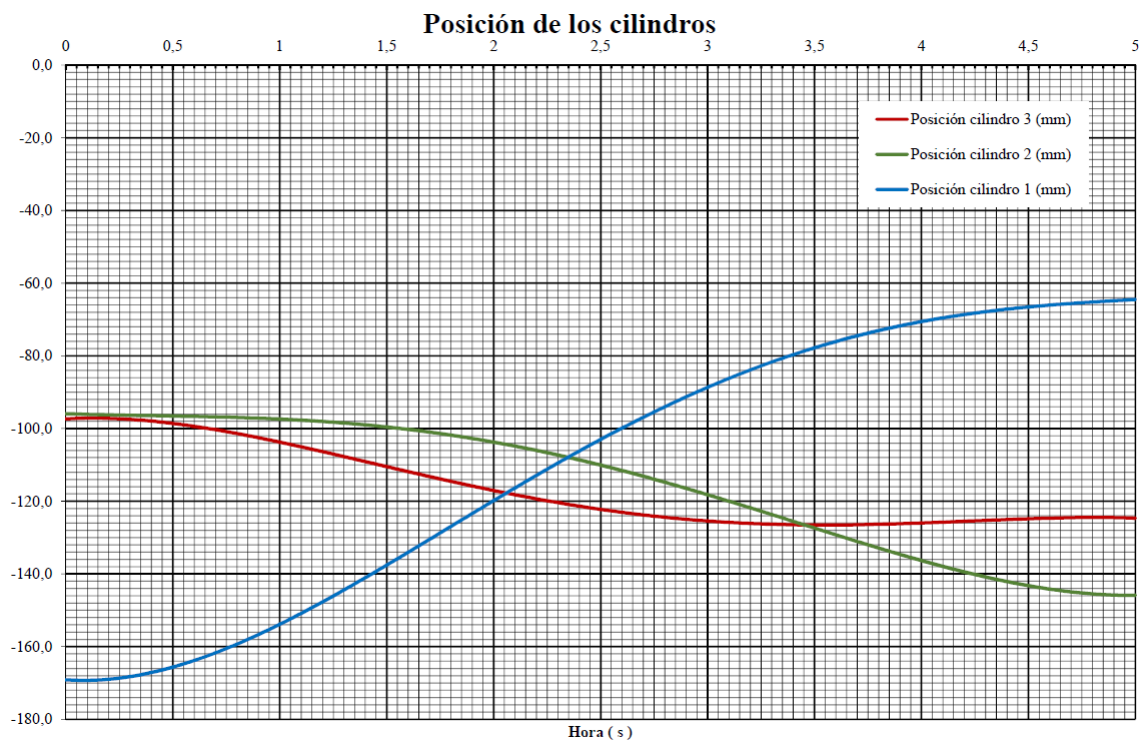


Figura 83: Posición de los cilindros en la aplicación de transporte

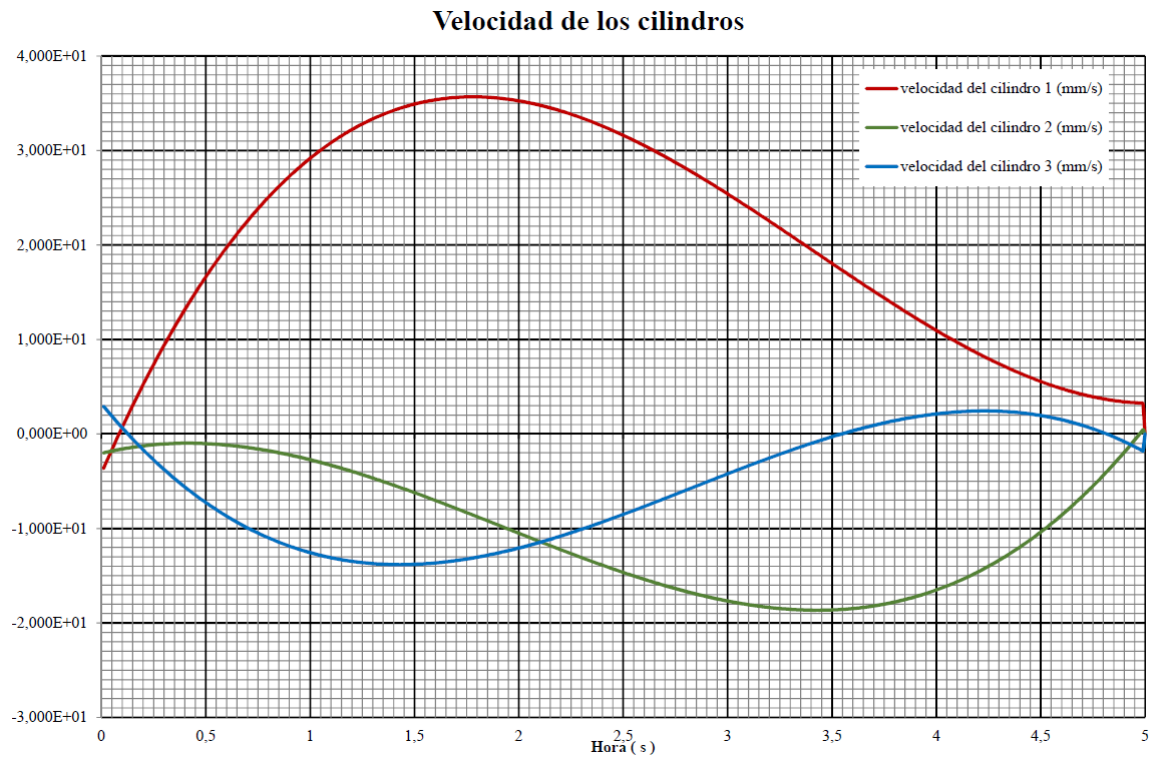


Figura 84: Velocidad de los cilindros en la aplicación de transporte

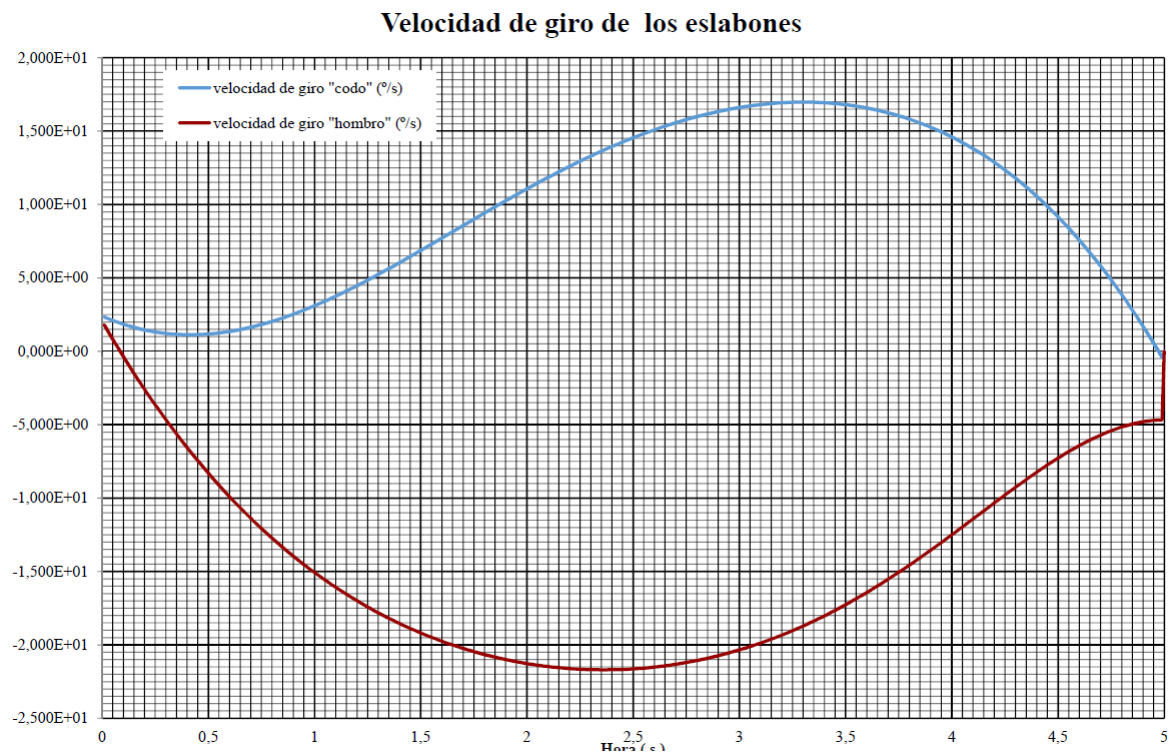


Figura 85: Velocidad de giro de los eslabones en la aplicación de transporte

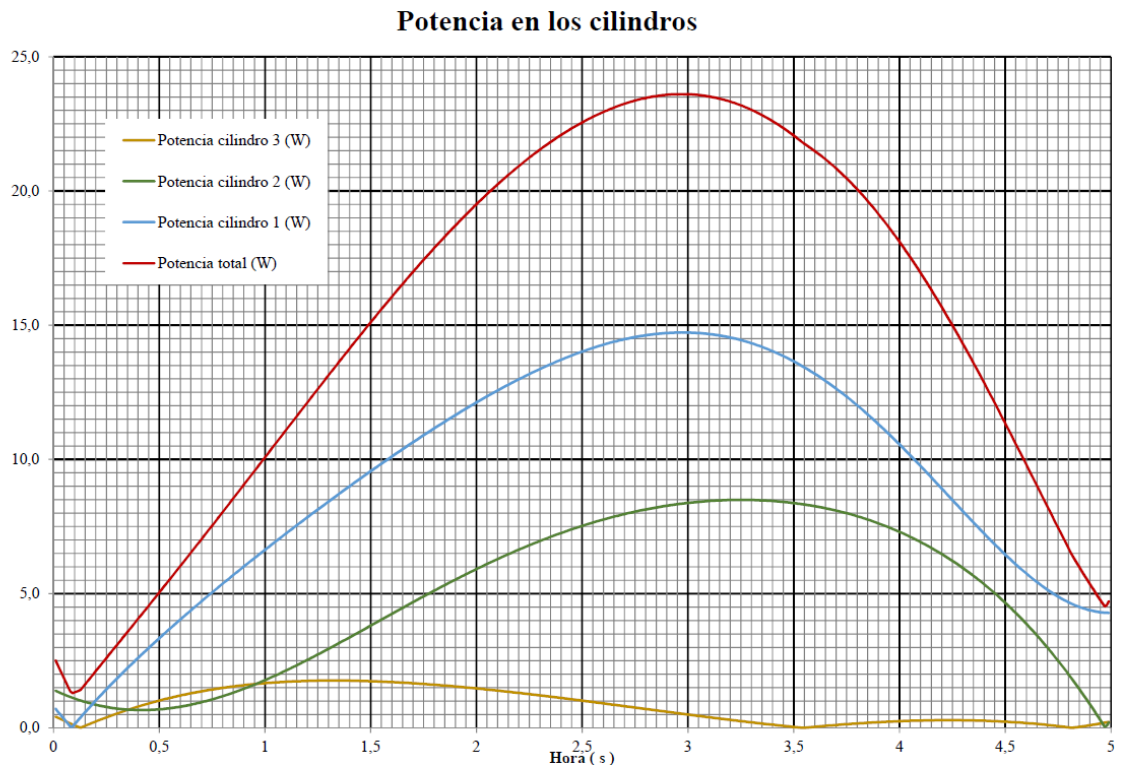


Figura 86: Potencia en los cilindros en la aplicación de transporte

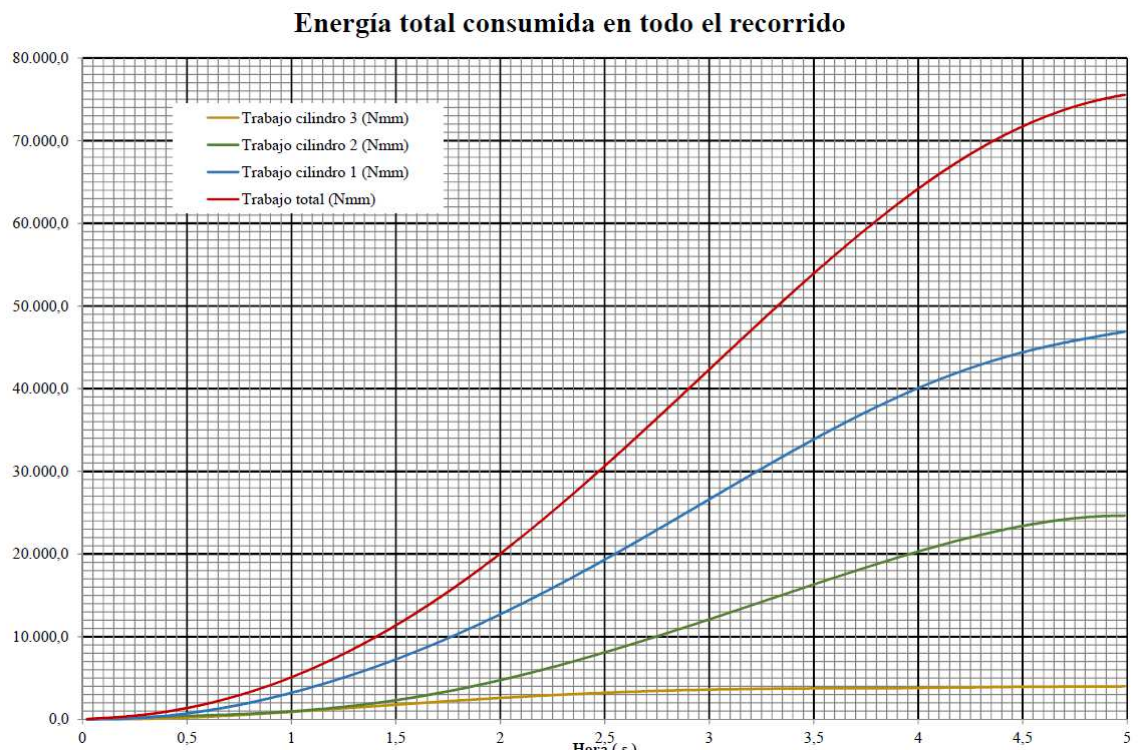


Figura 87: Energía total consumida en los cilindros en la aplicación de transporte

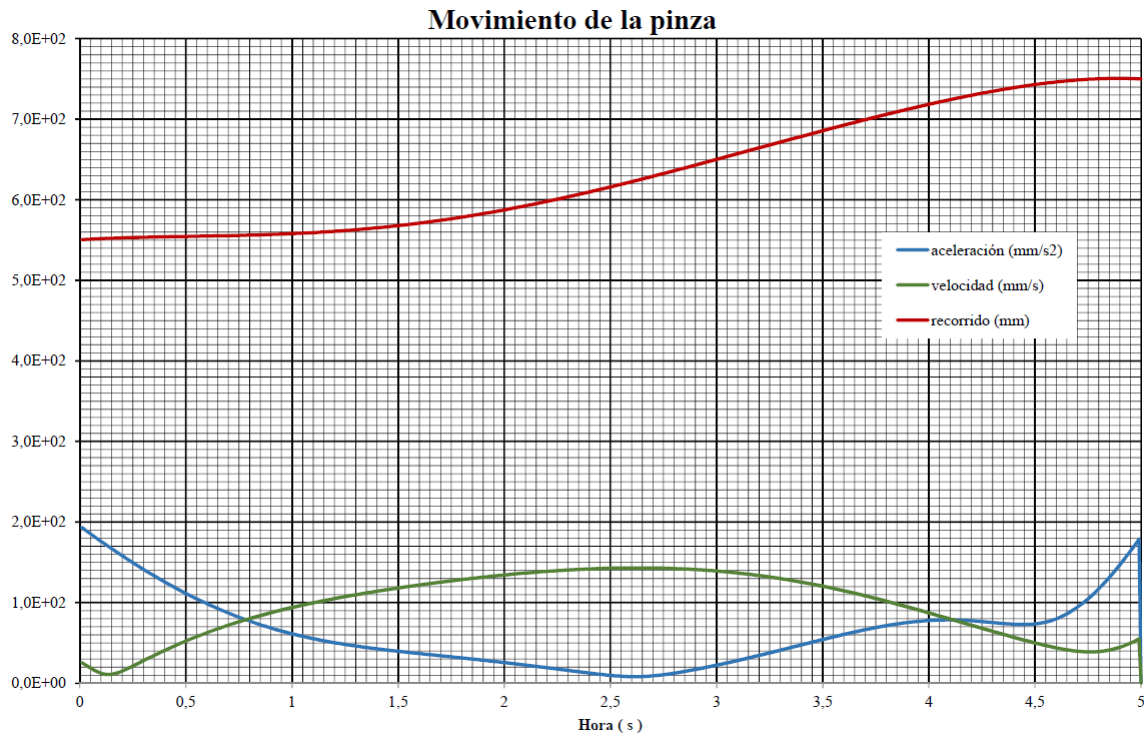


Figura 88: Características del movimiento de la pinza en la aplicación de transporte

8.2. Aplicación pintura

Otra aplicación típica de los brazos robóticos es realizar tareas de pintura, en este caso la simulación nos puede servir para calcular la velocidad necesaria en cada momento para que la capa de pintura sea uniforme sobre el elemento de trabajo de forma arbitraria que hemos definido.

Para esta aplicación la simulación nos sirve para calcular los parámetros de posición y velocidad.



Figura 89: Aplicación pintura

En la Figura 90 se presenta la posición de los cilindros necesaria para realizar la trayectoria requerida. En la Figura 91 se presenta la posición de la pinza obtenida.

En la Figura 92 y Figura 93 se presenta la velocidad y aceleración de la pinza durante toda la trayectoria

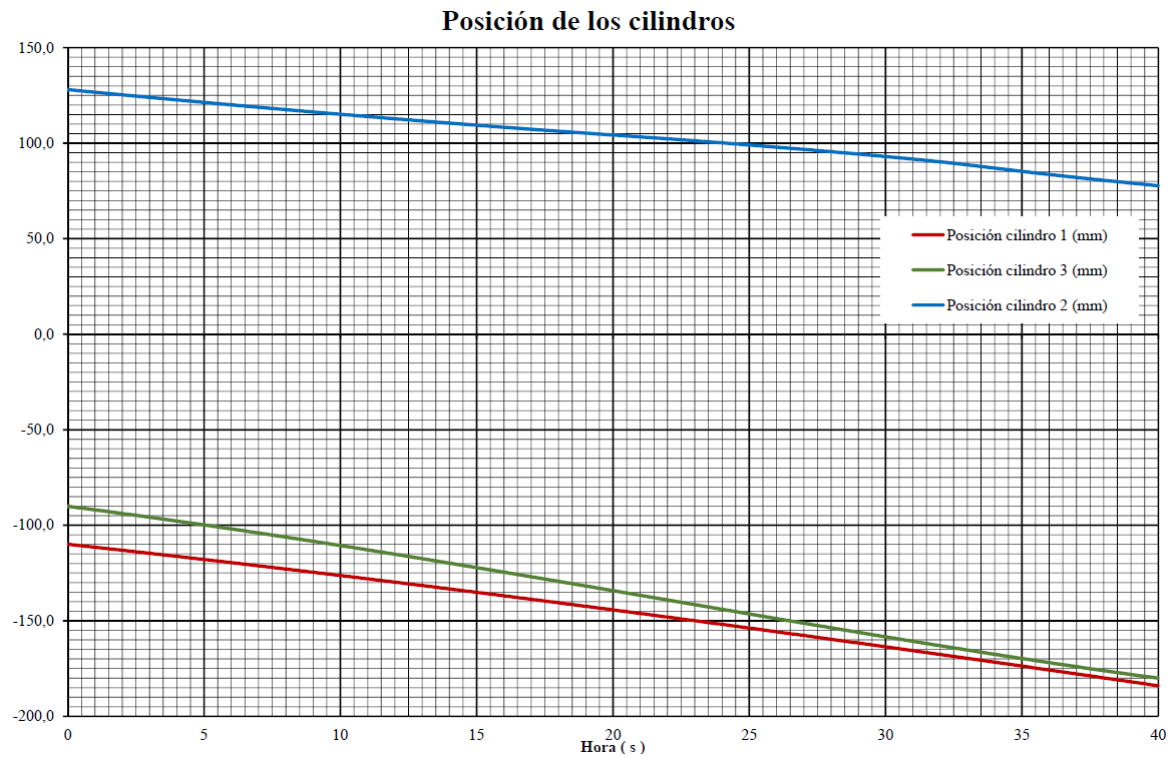


Figura 90: Posición de los cilindros en la aplicación de pintura

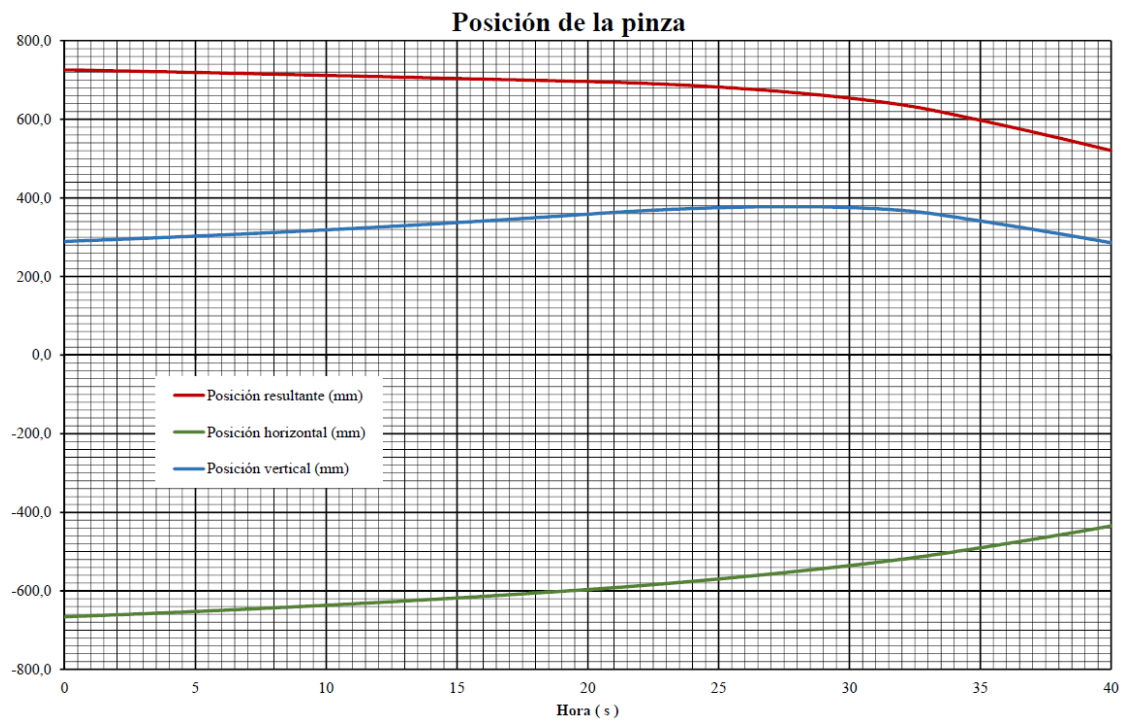


Figura 91: Posición de la pinza en la aplicación de pintura

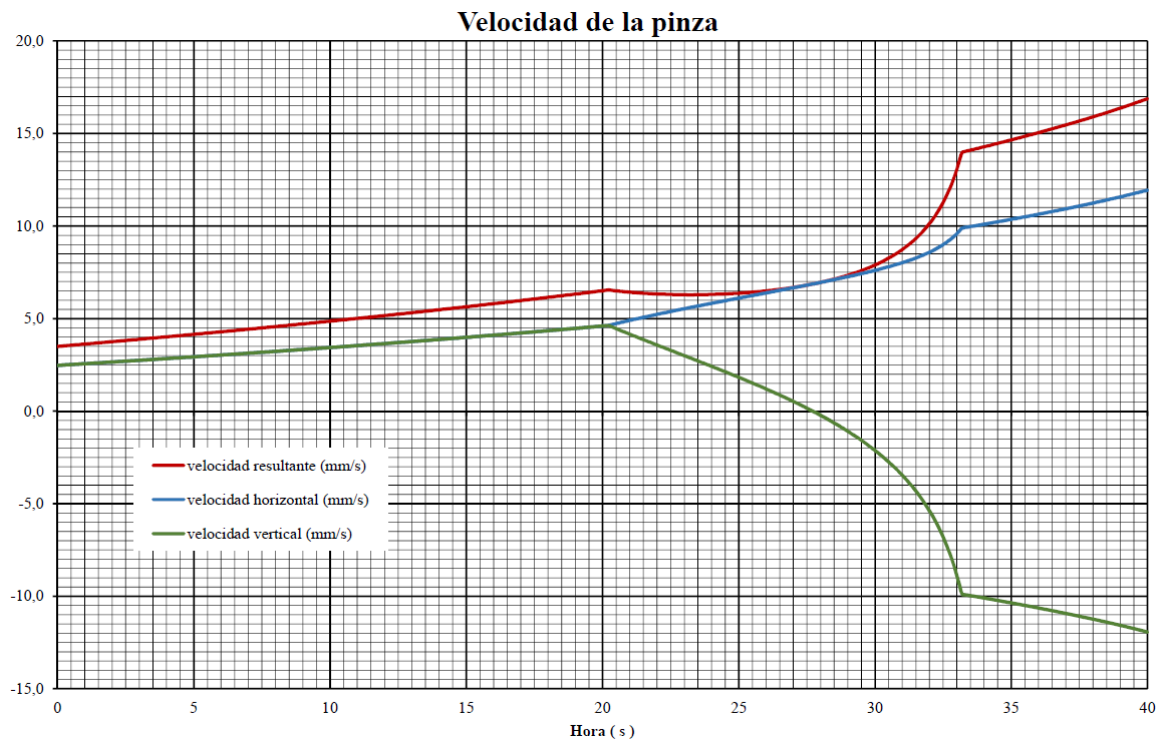


Figura 92: Velocidad de la pinza en la aplicación de pintura

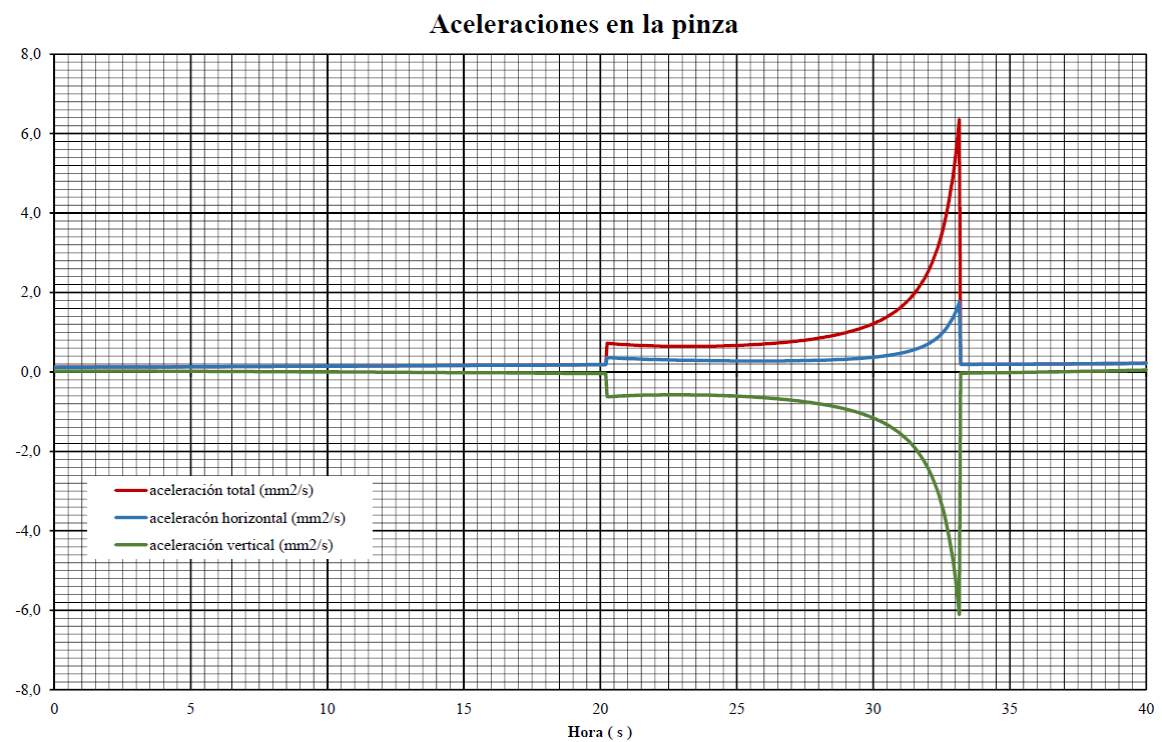


Figura 93: Aceleración de la pinza en la aplicación de pintura

8.3. Aplicación soldadura

Otra aplicación típica de este tipo de brazos robóticos es la aplicación de soldaduras, en este caso el control de trayectoria seguida por el equipo es de mayor importancia.

En la simulación se ha pretendido ilustrar la posibilidad de suplir las carencias de nuestro equipo respecto de a otros equipos descritos en el Apartado 2.2. En lo referente a ejes de movimiento, mediante la adicción de movimientos aplicados a la piza de trabajo, típicamente este movimiento será de revolución.

En una tarea de soldadura en control de la trayectoria es muy importante, por lo que debemos definir los movimientos lo más lento posible, también es importante no realizar frenados ni cambios bruscos de movimientos en los cilindros durante la operación de soldadura ya que se podrían introducir vibraciones como se observó en el Apartado 5.2



Figura 94: Aplicación soldadura

Capítulo 9

Conclusiones y trabajos futuros.

9.1. Conclusiones

El primer objetivo fundamental que nos habíamos marcado fue el de realizar el diseño de un brazo industrial sencillo, funcional y económico, utilizando únicamente actuadores neumáticos lineales. El diseño final denominado brazo neumático BN03, cumple con este objetivo plenamente.

Los objetivos parciales, que hemos logrado para conseguir este objetivo principal fueron los siguientes:

- Determinación de un proceso de diseño y delimitación de las tareas a realizar dentro del mismo. Este objetivo queda cumplido una vez definido el diagrama del proceso de diseño recogido en la Figura 33.
- Determinación de los requisitos de funcionamiento en base a los cuales se aprobará el diseño. En la Tabla 6 se recogen de forma resumida las especificaciones de trabajo de la máquina.
- Diseño mecánico según los principios de la Teoría de Máquinas y Mecanismos: estudio de las trayectorias, velocidades, aceleraciones y fuerzas a los que se encuentran sometidos los elementos de la máquina en su funcionamiento. Para conseguir este objetivo se han realizado simulaciones en la Figura 58 y siguientes se recogen los resultados del diseño final de brazo industrial.

- Diseño neumático del circuito y de los componentes necesarios para su implementación. Se han realizado el diseño y simulación del esquema neumático utilizando el software CAE: Automation Studio, en la Figura 65 se recoge el esquema neumático, en el Apartado 2.3.1 y Apartado 5.3 se recogen los componentes neumáticos seleccionados.
- Elaboración de planos y documentación necesaria para la fabricación. En el Apéndice 1, se recogen los planos de fabricación realizados, en la Tabla 10 aparece un listado de los planos generados.
- Estudio de costes de fabricación del equipo. En la Tabla 12 se recoge el cálculo del coste de fabricación del prototipo del diseño proyectado.

El segundo objetivo fundamental, el de utilizar las ventajas que nos suponen las herramientas de diseño CAD-CAE para realizar este diseño así como para realizar simulaciones y cálculos que supongan una ventaja propia de nuestro diseño de brazo industrial haber utilizado estas herramientas. Para cumplir con este objetivo el diseño se ha realizado utilizando herramientas CAD-CAE de última generación, Autodesk Inventor y Automation Studio, lo cual nos ha permitido cumplir con los subobjetivos que desarrollan este objetivo principal.

- Desarrollar un modelo con un software de diseño CAD-CAE que nos permita aprovechar las ventajas de este software en este proyecto. Se ha utilizado el software Autodesk Inventor, en el Apartado 3.3.1 y Apartado 3.3.2 se recoge una introducción a las herramientas del mismo utilizadas. Además la Figura 54 y en la Figura 55 representan imágenes del diseño realizado, los detalles de este diseño se incluyen en los planos recogidos en el Apéndice 1 con lo que se cumple con este objetivo.
- Realización de una simulación dinámica que nos permita comprobar si el diseño se ajusta a los parámetros definidos, para poder dar la aprobación al mismo. En la Figura 58 y siguientes se recoge los resultados de dicha simulación dichos resultados son satisfactorios por lo que se cumple este objetivo.
- Realización de una simulación neumática que nos permita ajustar los parámetros neumáticos del diseño a los requerimientos de funcionamiento determinados. En el Apartado 5.4 se recogen los resultados del estudio neumático elaborado mediante Automation Studio, en la Figura 69 y siguientes, se exponen gráficamente los resultados obtenidos en este análisis, con lo que se cumple este objetivo.
- Realización de varias simulaciones para determinar si la utilización de este tipo de software nos permite obtener ventajas en el diseño del equipo y comprobar si el diseño cumple satisfactoriamente con las necesidades de las aplicaciones para las que ha sido diseñado. Para cumplir con este objetivo se han realizado varias simulaciones en el entorno de simulación dinámica de Autodesk Inventor, los resultados se recogen en la Figura 82 y siguientes.

Queremos concluir diciendo que la principal aportación de este Proyecto Fin de Carrera es un diseño integral y realista de un brazo industrial, con todos sus elementos mecánicos perfectamente definidos, así como seleccionados los elementos normalizados. Además de incluir el sistema neumático que lo gestionaría.

9.2 Trabajos futuros

En la introducción del Capítulo 3 se expuso la imposibilidad de realizar todas las tareas definidas en el diagrama de procesos elaborado para el diseño de este equipo. Por lo tanto quedan pendientes de realizar varios trabajos que recogemos en este apartado.

Trabajos futuros:

- Estudio de viabilidad técnica, económica y medioambiental del diseño básico.
- Estudio de toda la normativa aplicable y la adecuación del diseño a la normativa europea y nacional de seguridad en máquinas y medioambiente.
- Definición formal de las especificaciones técnicas que debe cumplir la máquina, en este proyecto solamente se han definido las especificaciones elementales para poder realizar el diseño.
- Elaboración de la documentación necesaria de ingeniería de detalle para la instalación neumática sobre el equipo, ya que ésta no se ha incluido en la fase de diseño de detalle.
- Elaboración de una norma técnica de mantenimiento, cálculo de MTBF Mean Time Between Failures, tiempo medio entre fallos del sistema y MTTR Medium Time To Repair, tiempo medio hasta haber reparado la avería. Estudio AMFE, análisis de modos de fallo y efectos.
- Realización de los cálculos estructurales a fatiga de los componentes del equipo
- Estudio LCC (Lifecycle cost) del coste total del ciclo de vida desde su fabricación hasta su retirada del servicio y reciclado. Teniendo en cuenta los costes de mantenimiento y averías.
- Realización de un protocolo de ensayo para realizar las pruebas del prototipo.

Bibliografía

1. J.C.García Prada, C.Castejón Sisamón, H.Rubio Alonso; *Problemas resueltos de teoría de máquinas y mecanismos*; Ed. Thomson, 2007
2. SMC International Training, A.Rodriguez; *Neumática*; Ed. Thomson, 2002
3. N.Larburu; *Máquinas prontuario*; Ed. Paraninfo, 2008
4. A.L.Casillas; *Máquinas cálculos de taller*; Autor-editor, 2008
5. S.Kalpakjian, S.R.Schmid; *Manufactura, ingeniería y tecnología*; Ed. Pearson, 2008
6. J.E.Shigley, C.R.Mischke; *Diseño en ingeniería mecánica*; Ed. McGraw-Hill, 2006
7. K. Mathia; *Robotis for electronics manufacturing*; Cambridge university press, 2010
8. ISO 8573-1:2010, Aire comprimido: Contaminantes y grado de pureza
9. ISO 8373:1994, Robots industriales manipuladores: Vocabulario
10. ISO 216:1975, Formatos de papel
11. ISO 13715:2000, Dibujo técnico, aristas de forma indefinida
12. ISO 1219-1:2012, Sistemas y componentes de fluidos de potencia, simbología y diagramas de circuitos
13. ISO 6432:1985, Dimensiones de cilindros neumáticos
14. DIN 509:1998, Entalladuras
15. DIN 76:1984, Salidas de rosca para roscas métricas ISO
16. UNE 1-037:1983, acabados superficiales
17. http://es.wikipedia.org/wiki/Robot_industrial, última visita: octubre de 2013
18. http://es.wikipedia.org/wiki/Brazo_robotico, última visita: octubre de 2013
19. www.abb.com/robotics, última visita: octubre de 2013
20. www.trendrobotics.com, última visita: octubre de 2013
21. www.robotsltd.co.uk, última visita: octubre de 2013

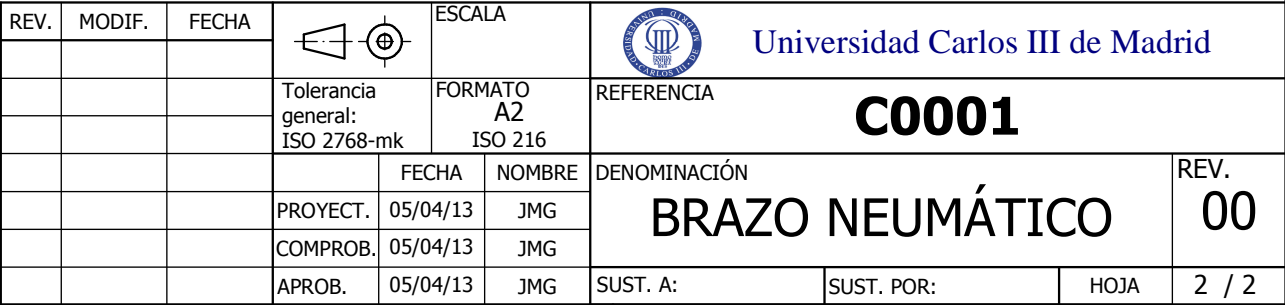
Catálogos

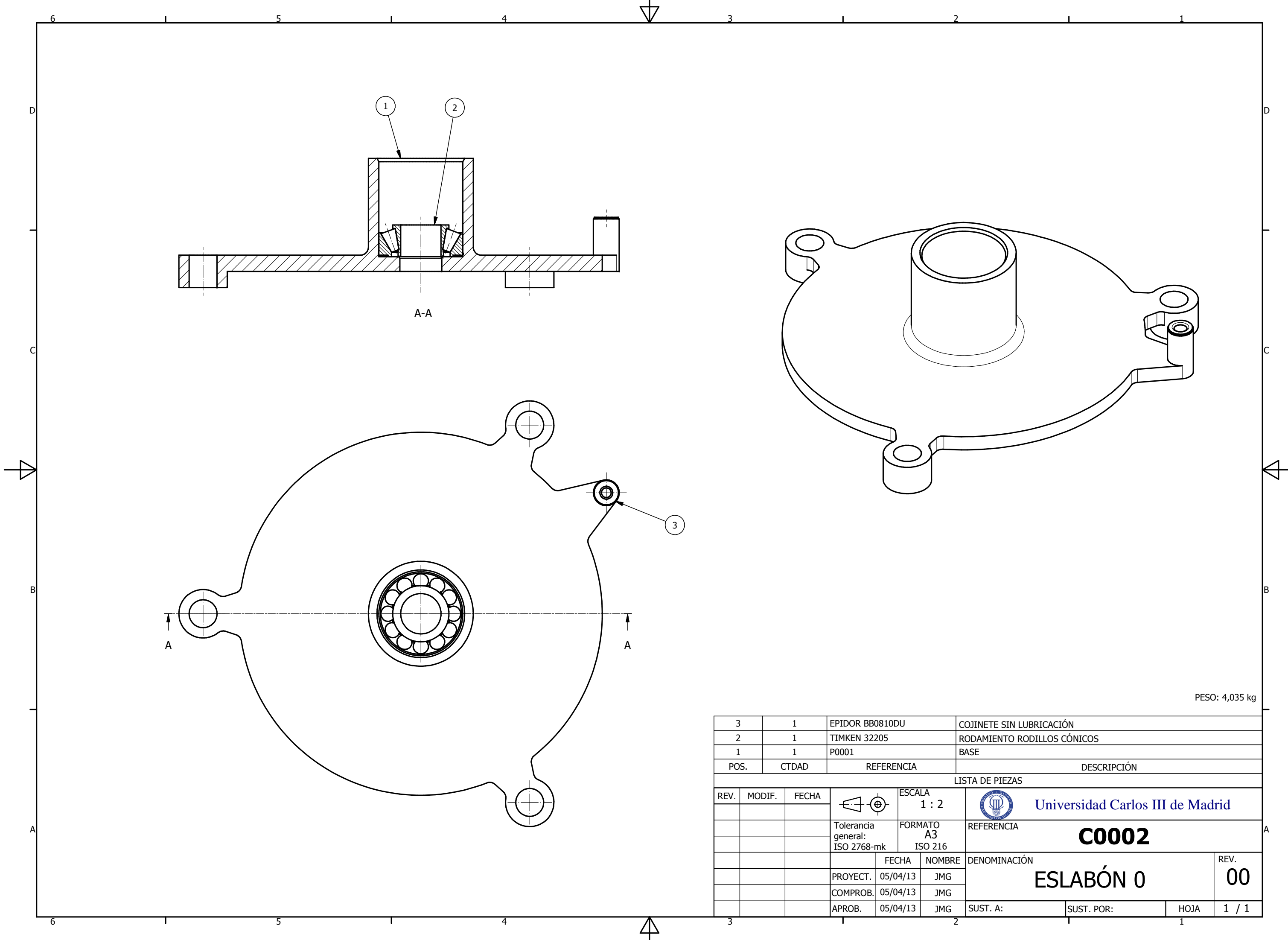
1. Epidor ®; *Cojinetes de deslizamiento*; 2010. http://www.epidor.com/documentos/Deslizamiento_Cojinetes.pdf
2. Seeger ®; Seeger rings DIN471 – DIN472; 2010 <http://www.seeger-orbis.com/seeger-rings-basic-types#>
3. Kuka Roboter GmbH; *KR Agilus Sixx*; 2012. http://www.kuka-robotics.com/res/sps/e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa_Spez_KR_AGILUS_sixx_en.pdf

4. ABB Robotics; *IRB 120*; 2012.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/3bd625bab3c7cae1c1257a0800495fac/\\$file/ROB0149EN_D_LR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/3bd625bab3c7cae1c1257a0800495fac/$file/ROB0149EN_D_LR.pdf)
5. Fanuc Robotics; *LR Mate*; 2012.
http://www.fanucrobotics.com/cmsmedia/datasheets/LR%20Mate%20200iC%20Series_10.pdf
6. Yaskawa Europe GmbH; *Motoman MH series*; 2012.
http://www.motoman.es/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=uploads/tx_catalogrobot/Flyer_Robot_MH5S-F_MH5LS-F_E_07.2013_26.pdf&t=1381174883&hash=4e5419b43555dfdf07ce429880d8e0965e6f0dd

Apendice 1

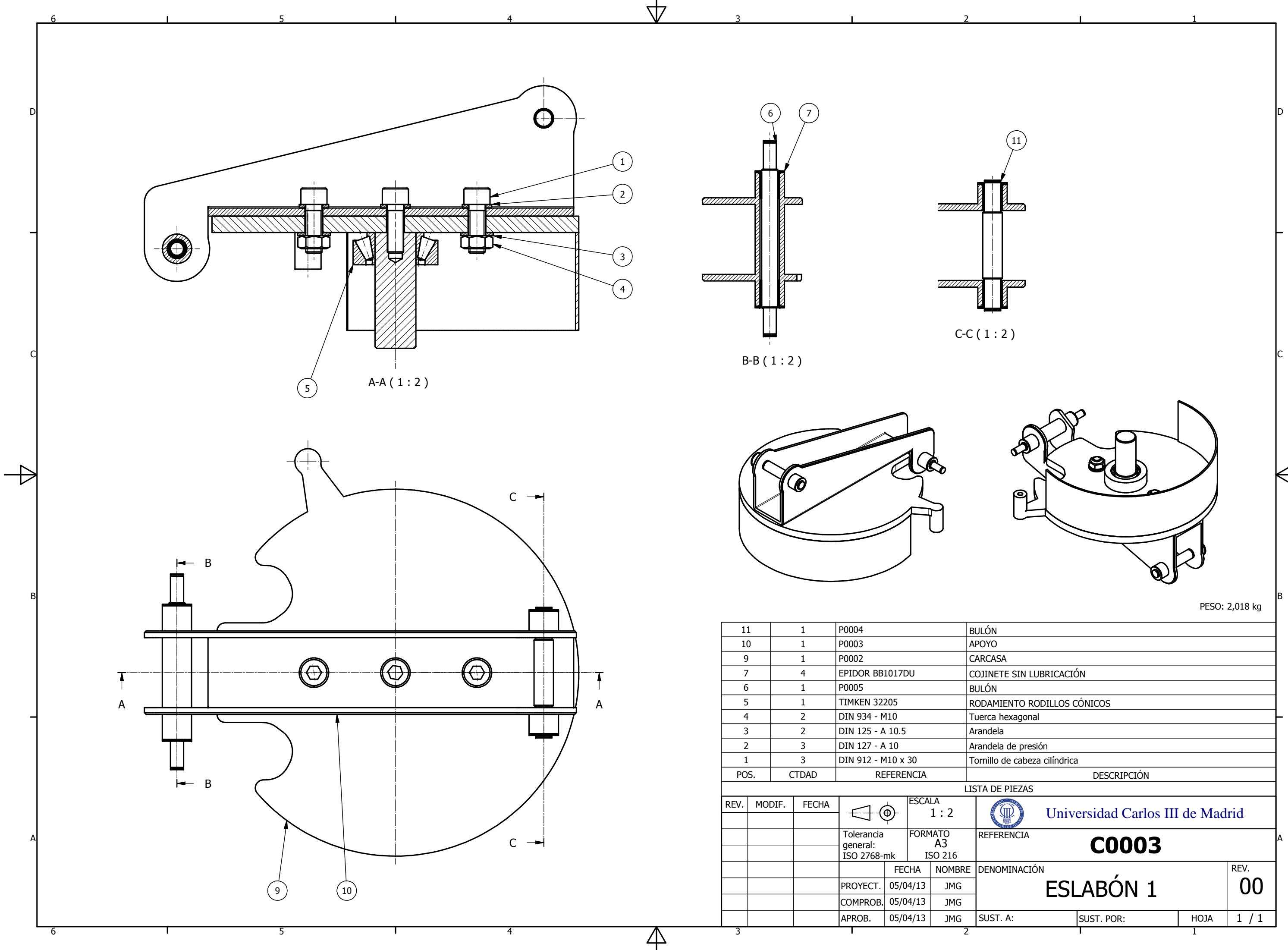
Planos de fabricación y montaje

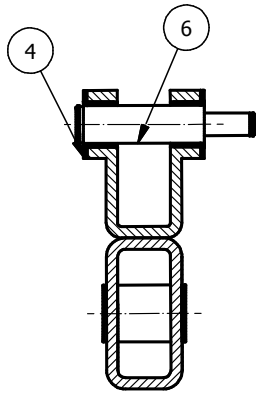




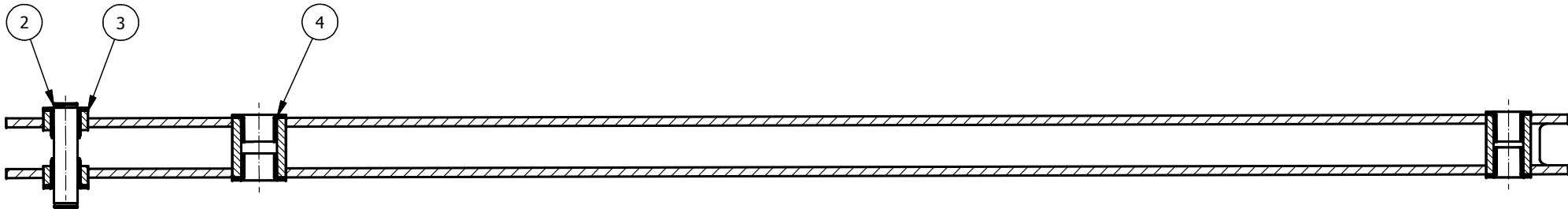
PESO: 4,035 kg

3	1	EPIDOR BB0810DU	COJINETE SIN LUBRICACIÓN						
2	1	TIMKEN 32205	RODAMIENTO RODILLOS CÓNICOS						
1	1	P0001	BASE						
POS.	CTDAD	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN						
LISTA DE PIEZAS									
REV.	MODIF.	FECHA		ESCALA 1 : 2	 Universidad Carlos III de Madrid				
			Tolerancia general: ISO 2768-mk	FORMATO A3 ISO 216		REFERENCIA C0002			
				FECHA	NOMBRE	DENOMINACIÓN ESLABÓN 0	REV. 00		
			PROYECT.	05/04/13	JMG				
			COMPROB.	05/04/13	JMG				
			APROB.	05/04/13	JMG	SUST. A:	SUST. POR:	HOJA	1 / 1

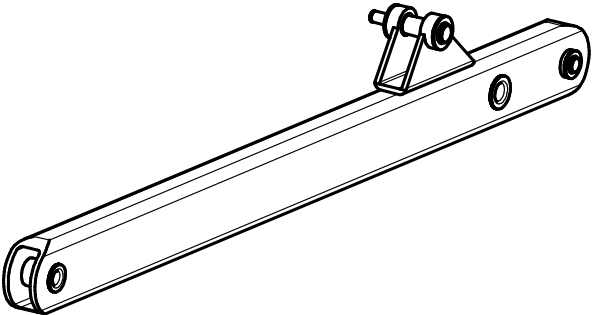





B-B (1 : 2)

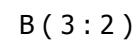
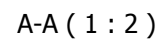
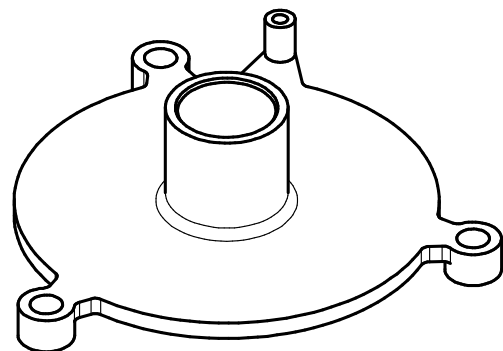


A-A (1 : 2)

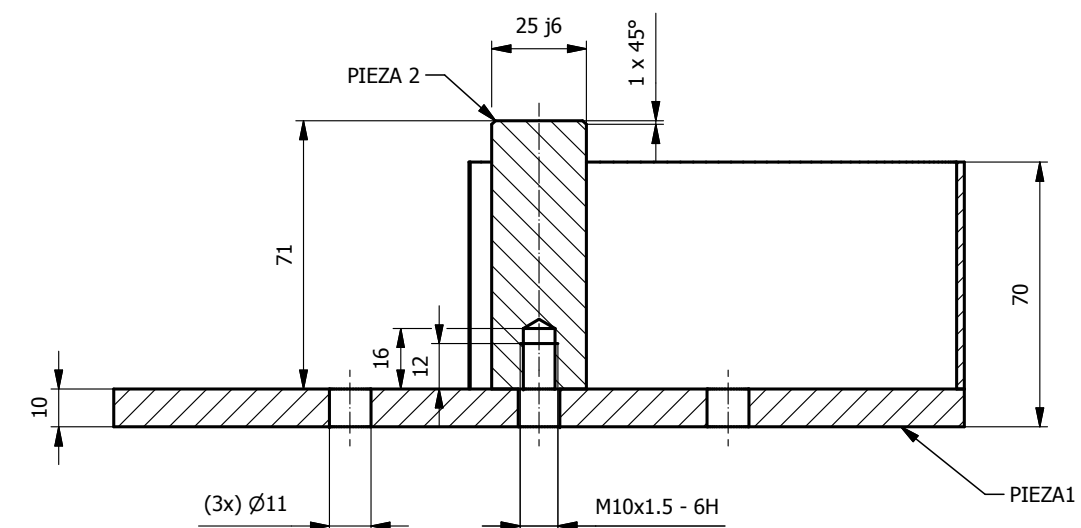
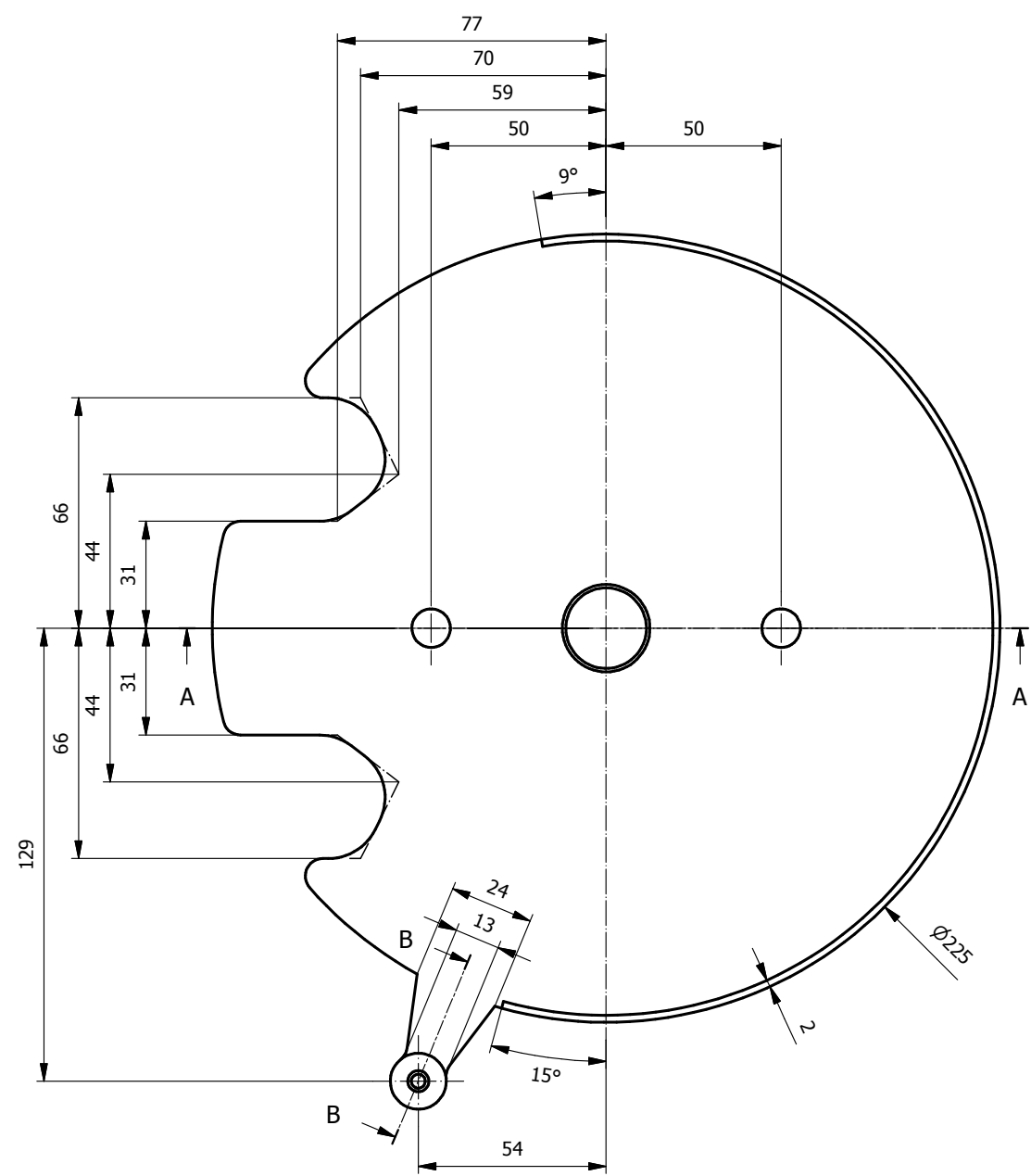


PESO: 0,519 kg

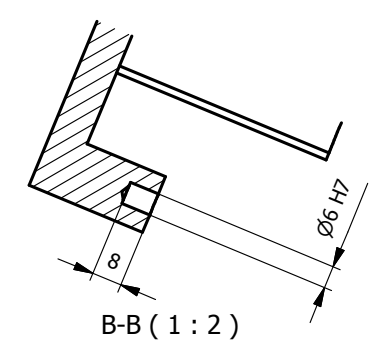
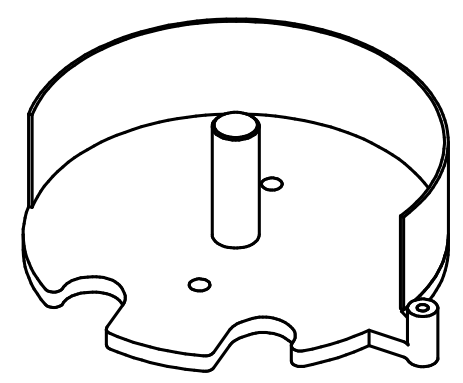
6	1	P0012	BULÓN	
4	4	EPIDOR BB1009DU	COJINETE SIN LUBRICACIÓN	
3	4	EPIDOR BB0810DU	COJINETE SIN LUBRICACIÓN	
2	1	P0011	BULÓN	
1	1	P0013	VIGA	
POS.	CTDAD	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN	
LISTA DE PIEZAS				
REV.	MODIF.	FECHA	 <div>ESCALA</div>	
				Universidad Carlos III de Madrid
		Tolerancia general: ISO 2768-mk	FORMATO A3 ISO 216	REFERENCIA C0005
			FECHA	NOMBRE
		PROYECT.	05/04/13	JMG
		COMPROB.	05/04/13	JMG
		APROB.	05/04/13	JMG
			UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID	
			REFERENCIA	
			C0005	
			DENOMINACIÓN	
			ESLABÓN 3	
			REV.	
			00	
			SUST. A:	SUST. POR:
			HOJA	1 / 1




<div>NOTAS</div> <div>Superficie marcada sin pintar</div> <div>Radios no acotados 5mm</div>						ACABADO SUP.		<div><div>0,8 / (6,4 /)</div></div>		UNE 1-037		PESO	
												N/D	
						MATERIAL		F-111				UNE 36011	
						TRAT. TÉRM.						ARISTAS	
						DUREZA						R=0,2	
						TRAT. SUP.		PAVONADO Y PINTADO RAL 9005				ISO 13715	
REV.	MODIF.	FECHA			ESCALA 1 : 2		<div></div> <div>Universidad Carlos III de Madrid</div>						
							REFERENCIA P0001						
			Tolerancia general: ISO 2768-mk		FORMATO A3 ISO 216								
				FECHA	NOMBRE	DENOMINACIÓN					REV.		
			PROYECT.	05/04/13	JMG	BASE					00		
			COMPROB.	05/04/13	JMG								
			APROB.	05/04/13	JMG	SUST. A:		SUST. POR:		HOJA		1 / 1	



A-A (1 : 2)

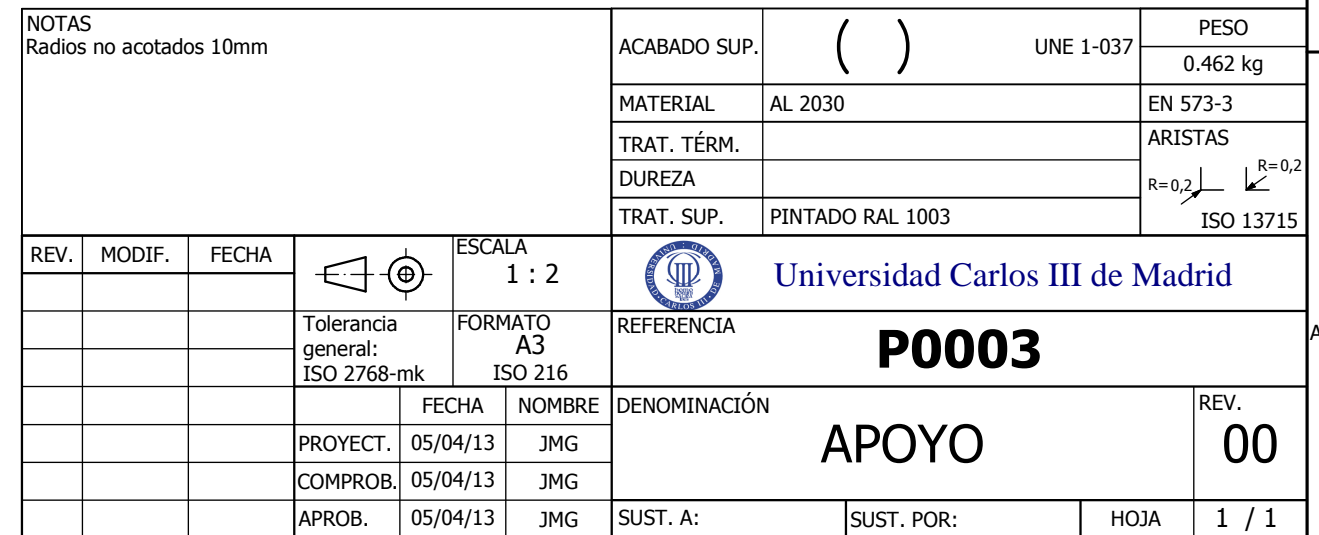
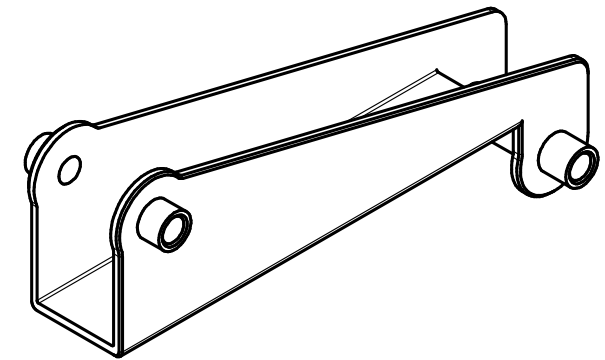


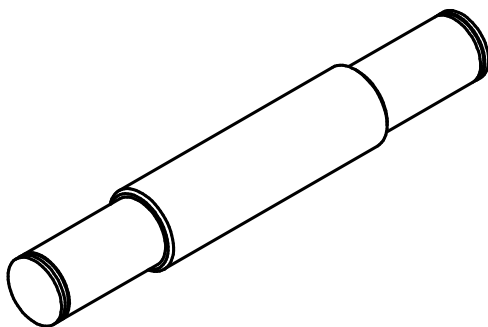
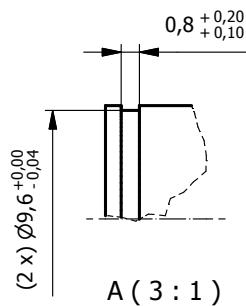
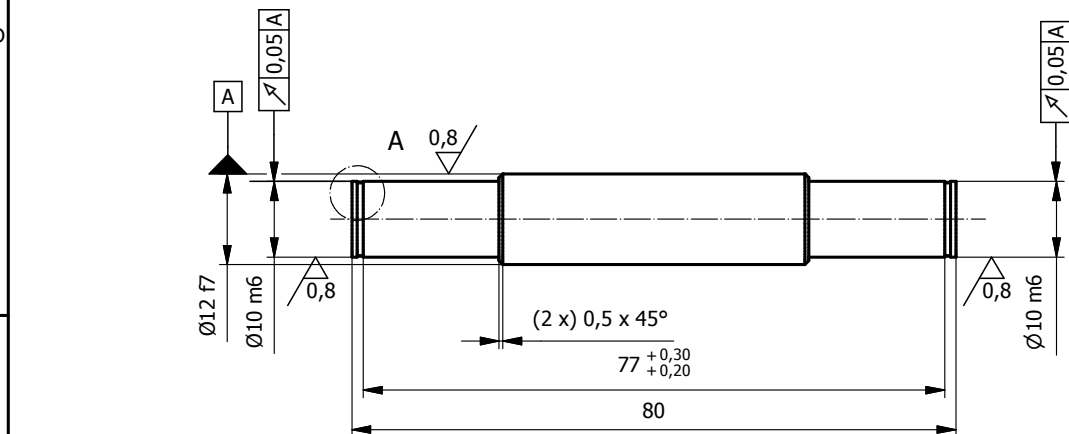
B-B (1 : 2)

PIEZA 2			
ACABADO SUP.	0,8 / (6,4)	UNE 1-037	PESO 0,450 kg
MATERIAL	F-1150		UNE 36011
TRAT. TÉRM.			ARISTAS
DUREZA			R=0,2
TRAT. SUP.	PAVONADO		ISO 13715
PIEZA 1			
ACABADO SUP.	0,8 / (6,4)	UNE 1-037	PESO 0,803 kg
MATERIAL	AL 2030		EN 573-3
TRAT. TÉRM.			ARISTAS
DUREZA			R=0,2
TRAT. SUP.	PINTADO RAL 9005		ISO 13715
<div></div> <div>Universidad Carlos III de Madrid</div>			
REFERENCIA	P0002		
DENOMINACIÓN	CARCASA		REV. 00
SUST. A:	SUST. POR:	HOJA	1 / 1

NOTAS Radios no acotados 5mm					
REV.	MODIF.	FECHA	ESCALA		
			Tolerancia general: ISO 2768-mk		
			FORMATO A3 ISO 216		
			FECHA	NOMBRE	
			PROYECT.	05/04/13	JMG
			COMPROB.	05/04/13	JMG
			APROB.	05/04/13	JMG

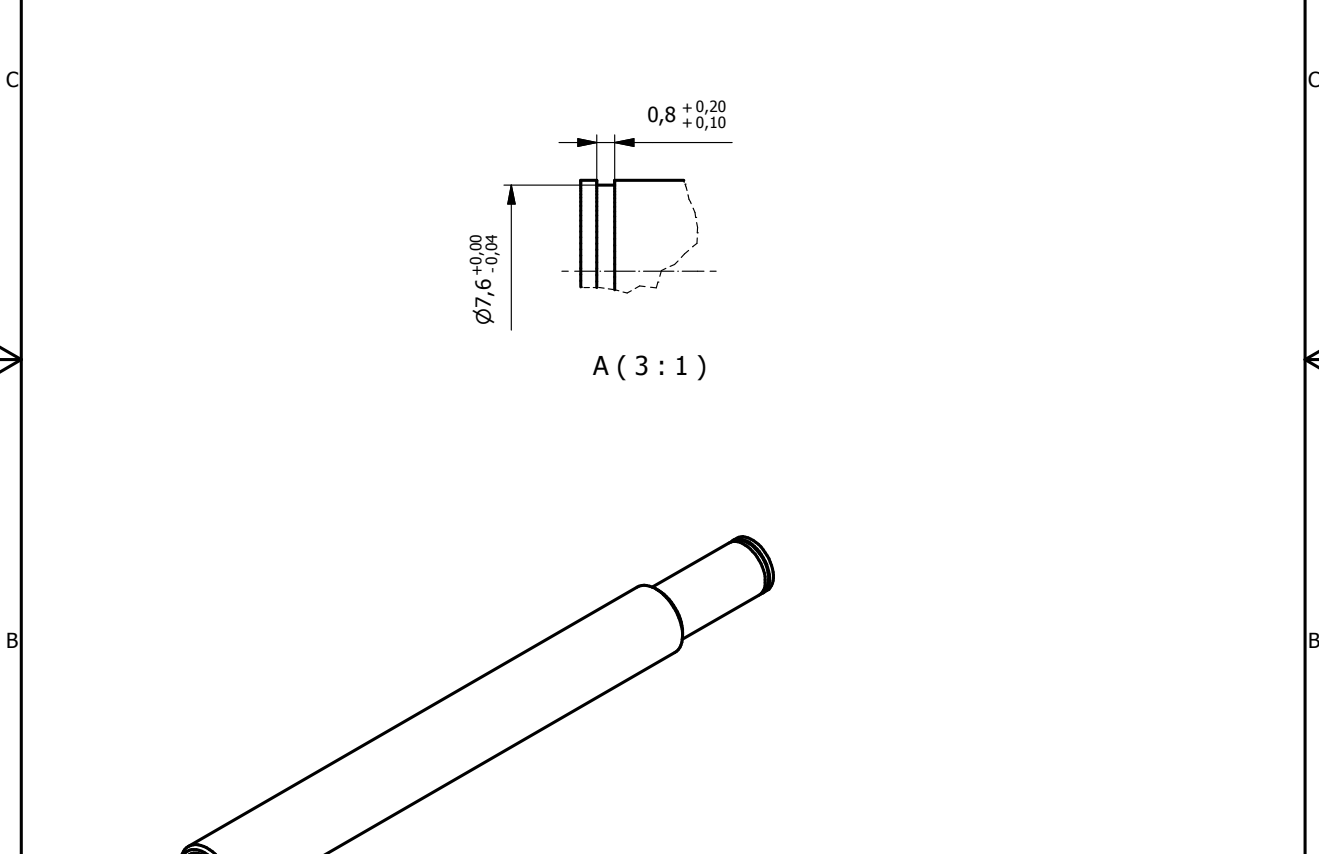
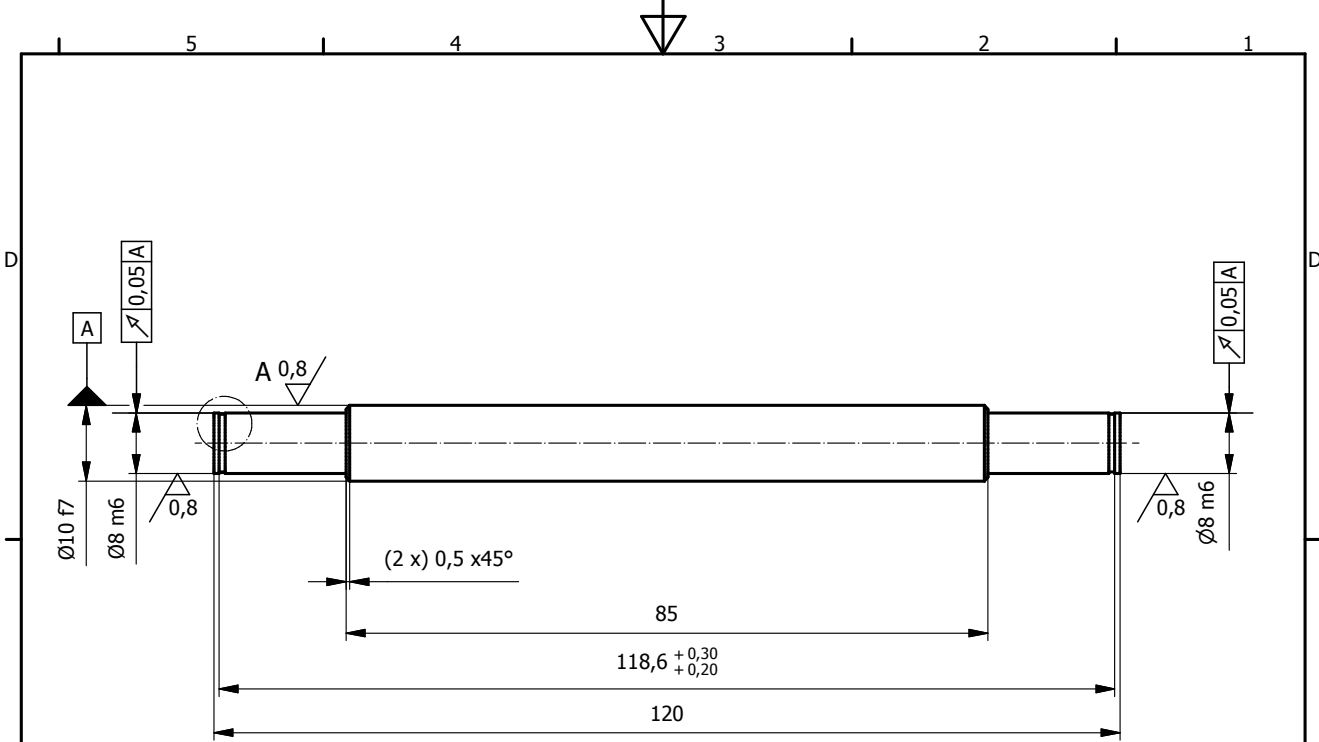
Universidad Carlos III de Madrid			
REFERENCIA			
P0002			
DENOMINACIÓN			REV.
CARCASA			00
SUST. A:	SUST. POR:	HOJA	1 / 1



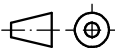



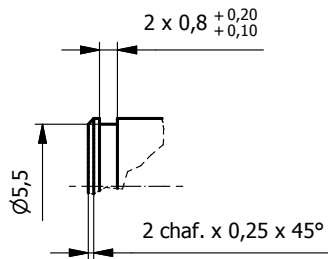
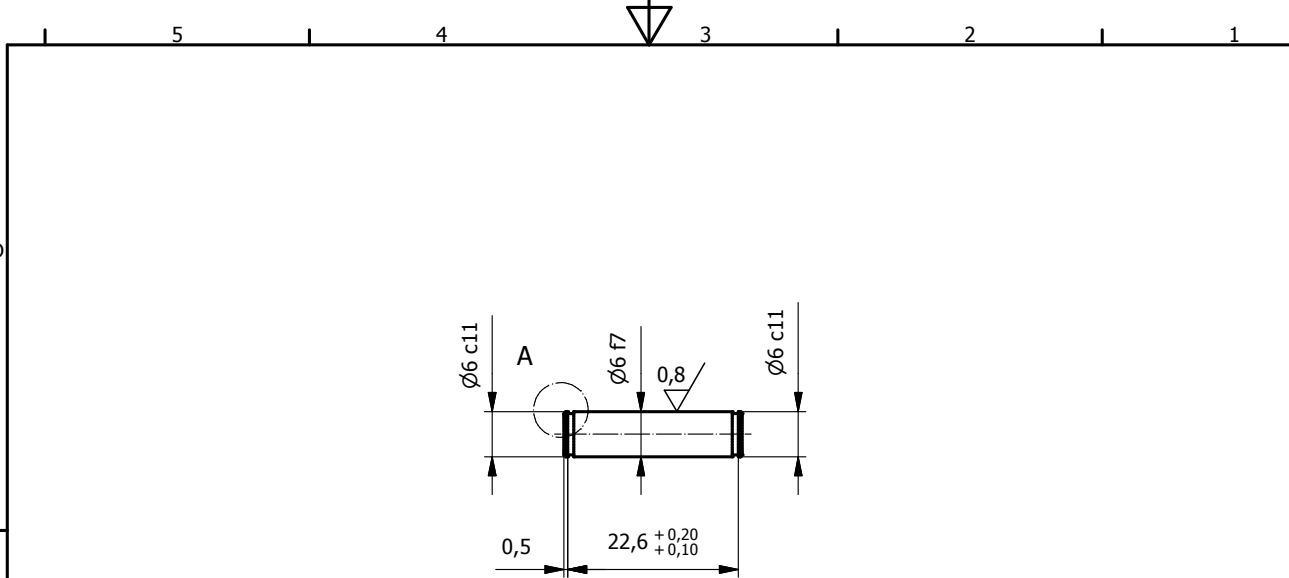
ACABADO SUP.	6,4 / (0,8)	UNE 1-037	PESO
			0.060 kg
MATERIAL	F-1140		UNE 36011
TRAT. TÉRM.	TEMPLADO		ARISTAS
DUREZA	55-60 HRC 1mm		R=0,2
TRAT. SUP.	PAVONADO		R=0,2
			ISO 13715

REV.	MODIF.	FECHA	ESCALA	Universidad Carlos III de Madrid			
			1 : 1	REFERENCIA			
			Tolerancia general: ISO 2768-mk	FORMATO A4	P0004		
				ISO 216	DENOMINACIÓN		
			FECHA	NOMBRE	BULÓN		REV.
			PROYECT.	JMG			00
			COMPROB.	JMG			
			APROB.	JMG	SUST. A:	SUST. POR:	HOJA
							1 / 1

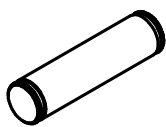




ACABADO SUP.	$\nabla 6,4 / (0,8 \nabla)$	UNE 1-037	PESO
			0,066 kg
MATERIAL	F-1140		UNE 36011
TRAT. TÉRM.	TEMPLADO		ARISTAS
DUREZA	55-60 HRC 1mm		<div><div><div><div></div><div>$R=0,2$</div></div><div><div></div><div>$R=0,2$</div></div></div></div>
TRAT. SUP.	PAVONADO		
			ISO 13715

REV.	MODIF.	FECHA				ESCALA 1 : 1	 Universidad Carlos III de Madrid			
			Tolerancia general: ISO 2768-mk			FORMATO A4 ISO 216	REFERENCIA P0005			
				FECHA	NOMBRE	DENOMINACIÓN BULÓN			REV.	
			PROYECT.	05/04/13	JMG				00	
			COMPROB.	05/04/13	JMG					
			APROB.	05/04/13	JMG	SUST. A:	SUST. POR:	HOJA	1 / 1	



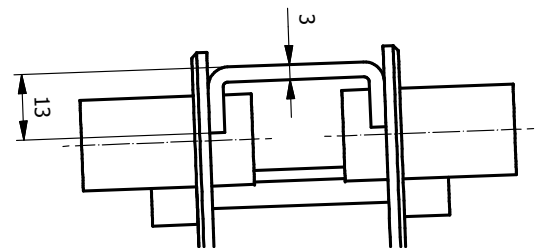
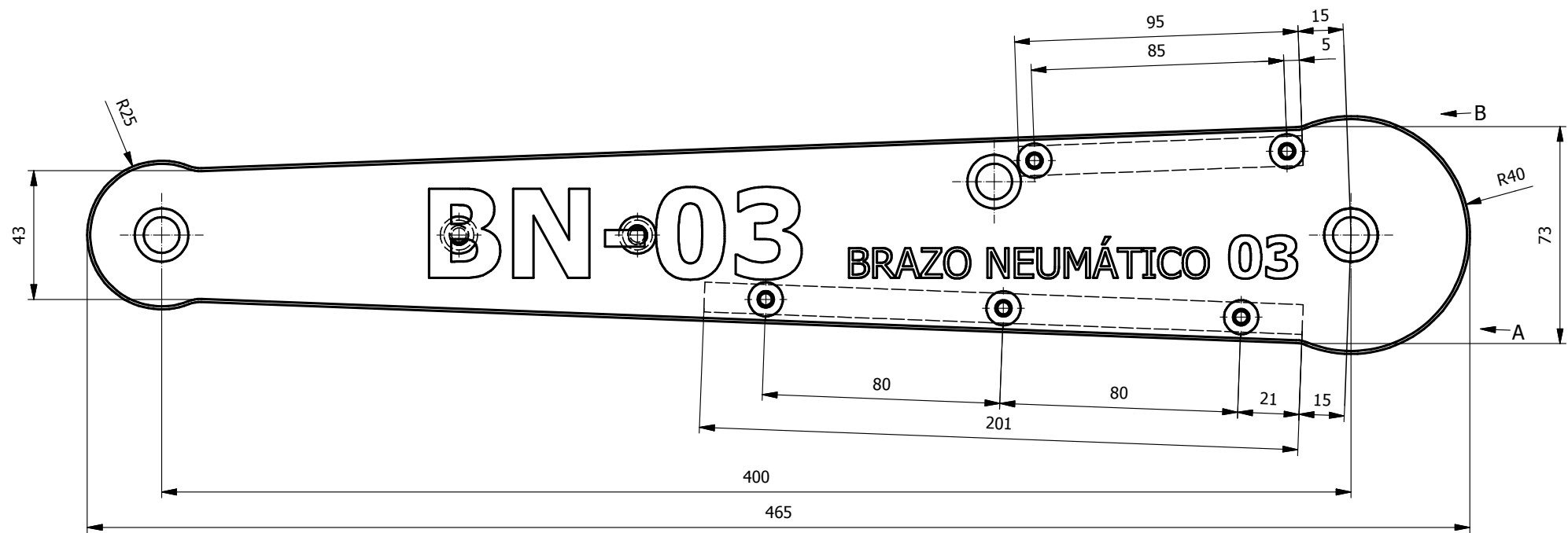
A (3 : 1)



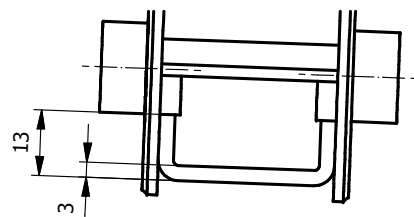
ACABADO SUP.	$6,4 / \left(\begin{array}{c} 0,8 \\ \nabla \end{array} \right)$	UNE 1-037	PESO
			0,005 kg
MATERIAL	F-1140		UNE 36011
TRAT. TÉRM.	TEMPLADO		ARISTAS
DUREZA	55-60 HRC 1mm		$R=0,2$ 
TRAT. SUP.	PAVONADO		$R=0,2$ 
			ISO 13715

REV.	MODIF.	FECHA		ESCALA	
				1 : 1	
			Tolerancia general: ISO 2768-mk	FORMATO	
				A4	
				FECHA	NOMBRE
			PROYECT.	05/04/13	JMG
			COMPROB.	05/04/13	JMG
			APROB.	05/04/13	JMG

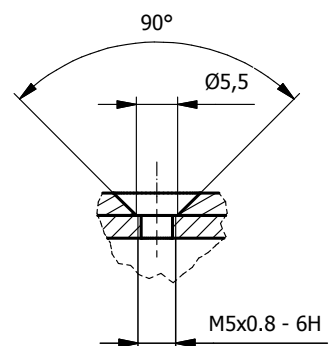
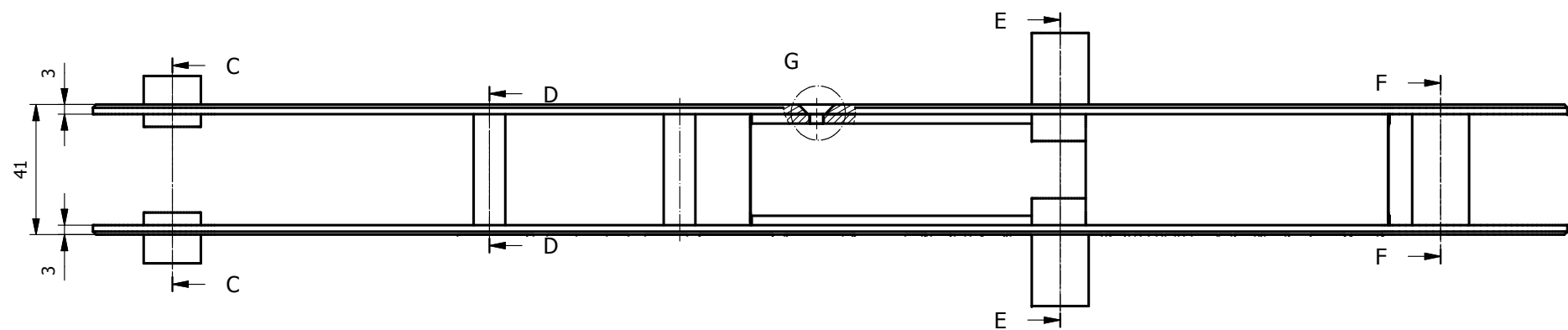
				Universidad Carlos III de Madrid			
REFERENCIA				P0006			
DENOMINACIÓN						REV.	
						00	
SUST. A:		SUST. POR:		HOJA	1 / 1		



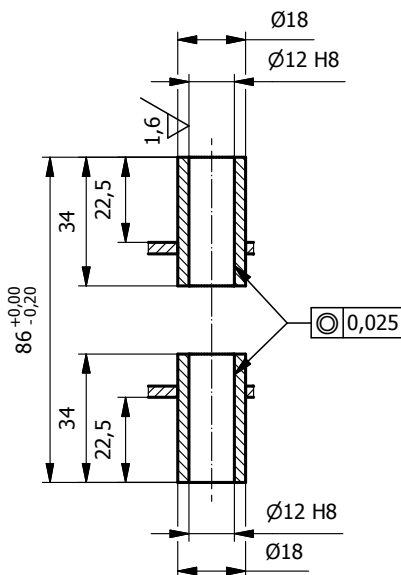
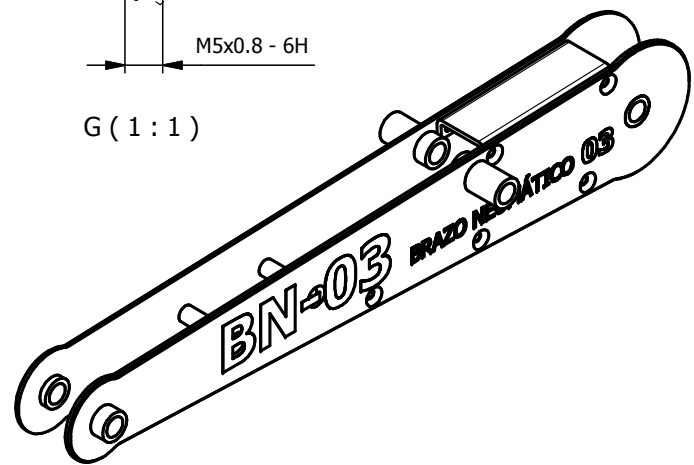
B (2 : 3)



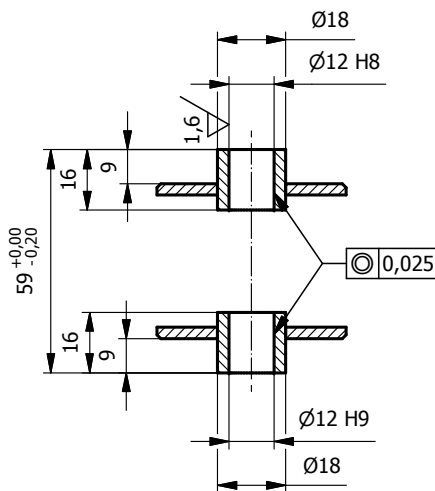
A (2 : 3)



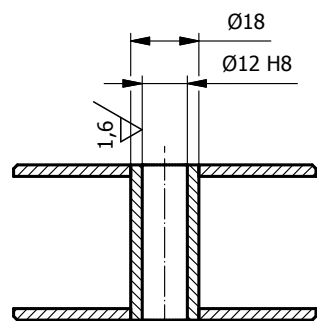
G (1 : 1)



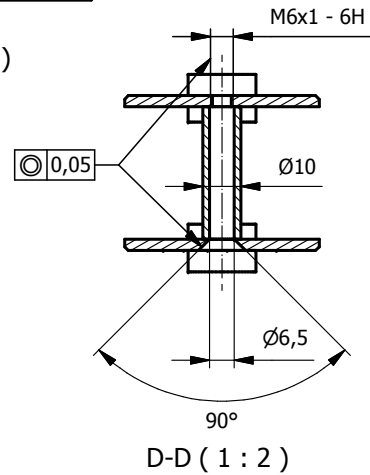
E-E (1 : 2)



C-C (1 : 2)

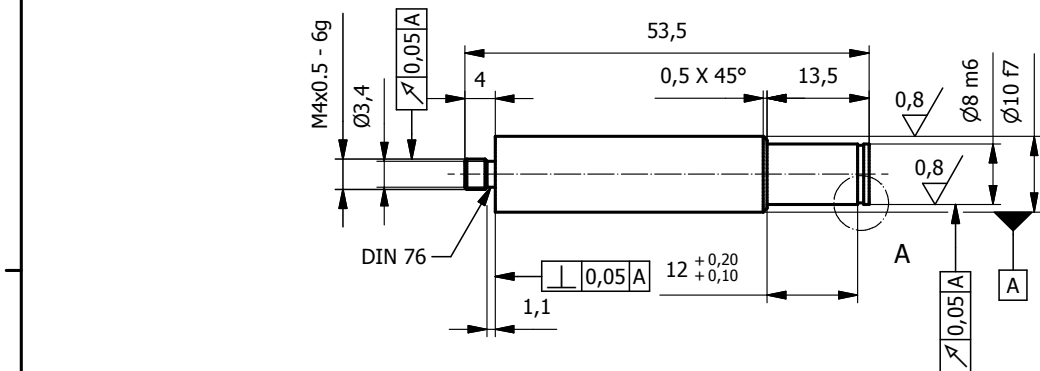


F-F (1 : 2)

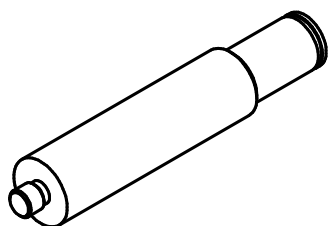


D-D (1 : 2)

NOTAS Radios no acotados 10mm					ACABADO SUP.	6,4 / (1,6)	UNE 1-037	PESO
					MATERIAL	AL 2030		0.610 kg
					TRAT. TÉRM.			EN 573-3
					DUREZA			ARISTAS
					TRAT. SUP.	PINTADO RAL 1003		R=0,2 ISO 13715
					REFERENCIA			
					P0007			
					DENOMINACIÓN			
					VIGA			
					REV.			
					00			
					HOJA			
					1 / 1			

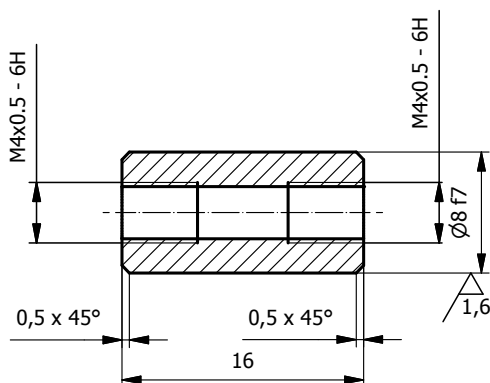


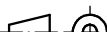
A (3 : 1)




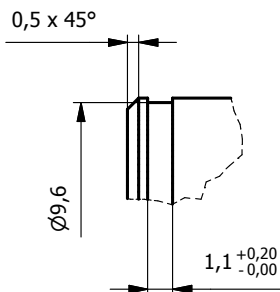
ACABADO SUP.	$6,4 / \left(\begin{array}{c} 0,8 \\ \nabla \end{array} \right)$	UNE 1-037	PESO
			0.028 kg
MATERIAL	F-1140		UNE 36011
TRAT. TÉRM.	TEMPLADO		ARISTAS
DUREZA	55-60 HRC 1mm		<div><div><div></div><div>$R=0,2$</div></div><div><div></div><div>$R=0,2$</div></div></div>
TRAT. SUP.	PAVONADO		
			ISO 13715

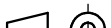
REV.	MODIF.	FECHA		ESCALA	Universidad Carlos III de Madrid			
				1 : 1				
			Tolerancia general: ISO 2768-mk	FORMATO A4 ISO 216	REFERENCIA P0008			
					DENOMINACIÓN BULÓN			REV. 00
			PROYECT.	05/04/13	JMG	SUST. A:		
			COMPROB.	05/04/13	JMG			
			APROB.	05/04/13	JMG	SUST. POR:	HOJA	1 / 1



REV.	MODIF.	FECHA			ESCALA 1 : 1
					FORMATO A4 ISO 216
			Tolerancia general: ISO 2768-mk		
				FECHA	NOMBRE
			PROYECT.	05/04/13	JMG
			COMPROB.	05/04/13	JMG
			APROB.	05/04/13	JMG

		155 15715	
Universidad Carlos III de Madrid			
REFERENCIA		P0009	
DENOMINACIÓN			REV.
EJE			00
SUST. A:	SUST. POR:	HOJA	1 / 1



REV.	MODIF.	FECHA			ESCALA	
					1 : 1	
			Tolerancia general: ISO 2768-mk		FORMATO A4 ISO 216	
				FECHA	NOMBRE	
			PROYECT.	05/04/13	JMG	
			COMPROB.	05/04/13	JMG	
			APROB.	05/04/13	JMG	

Universidad Carlos III de Madrid

REFERENCIA

P0010

DENOMINACIÓN

BULÓN

REV.

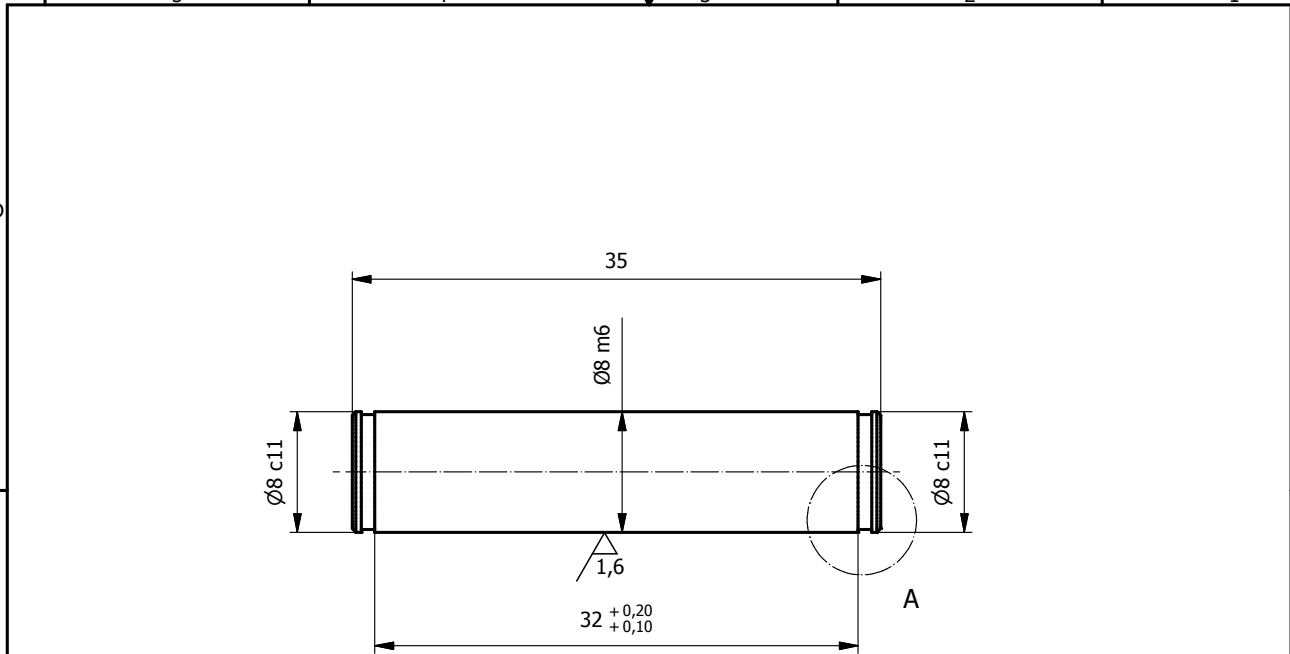
00

SUST. A:	
----------	--

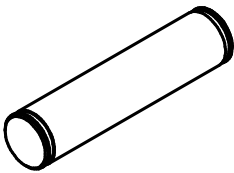
SUST. POR:	
------------	--

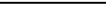
HOJA

1 / 1



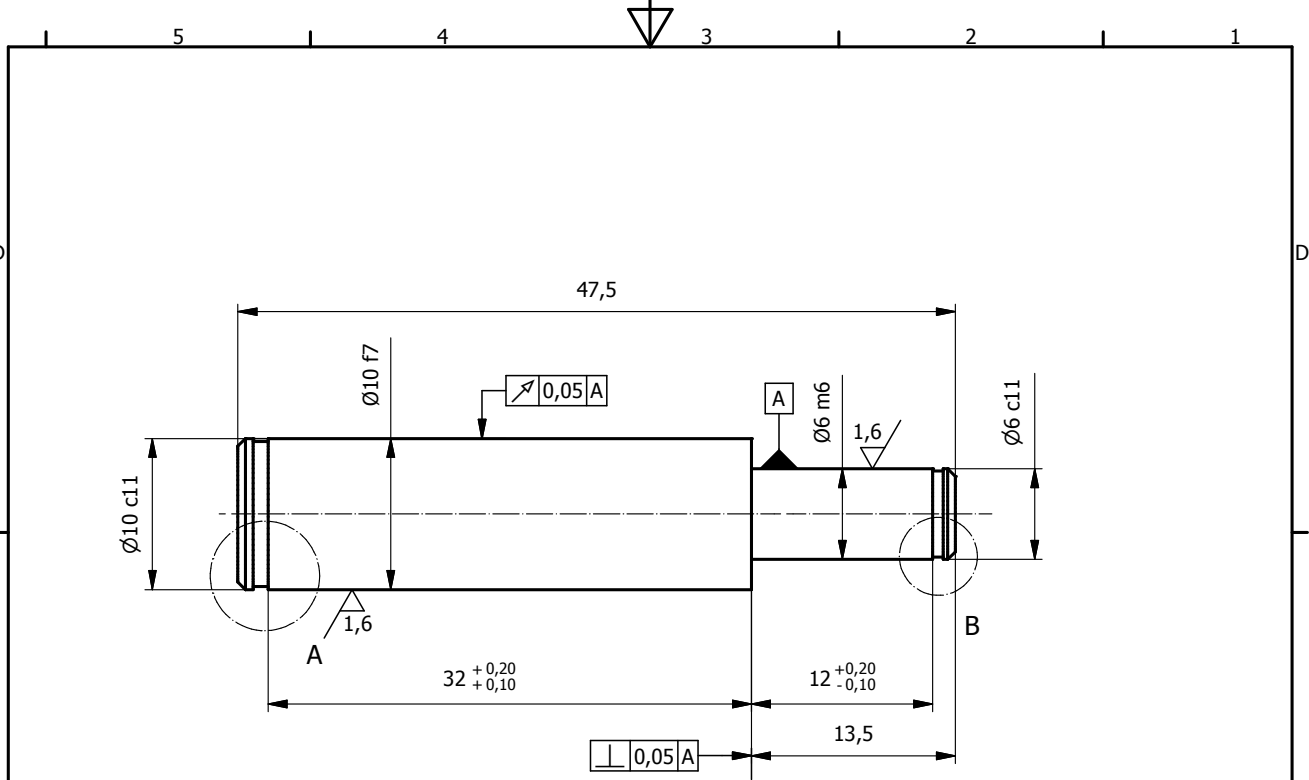
A (3 : 1)



ACABADO SUP.	$\frac{6,4}{\sqrt{}}\left(\frac{0,8}{\sqrt{}}\right)$	UNE 1-037	PESO
			0,014 kg
MATERIAL	F-1140		UNE 36011
TRAT. TÉRM.	TEMPLADO		ARISTAS
DUREZA	55-60 HRC 1mm		 R=0,2
TRAT. SUP.	PAVONADO		
			ISO 13715

REV.	MODIF.	FECHA		ESCALA
				1 : 1
			Tolerancia general: ISO 2768-mk	FORMATO
				A4
				ISO 216
			FECHA	NOMBRE
			PROYECT.	05/04/13 JMG
			COMPROB.	05/04/13 JMG
			APROB.	05/04/13 JMG

				Universidad Carlos III de Madrid			
REFERENCIA				P0011			
DENOMINACIÓN				BULÓN			
SUST. A:				SUST. POR:			
HOJA				1 / 1			



A (3 : 1)

B (3 : 1)

ACABADO SUP.	6,4 / (0,8)	UNE 1-037	PESO
			0.024 kg
MATERIAL	F-1140		UNE 36011
TRAT. TÉRM.	TEMPLADO		ARISTAS
DUREZA	55-60 HRC 1mm		R=0,2
TRAT. SUP.	PAVONADO		ISO 13715

REV.	MODIF.	FECHA	ESCALA
			1 : 1
			Tolerancia general: ISO 2768-mk
			FORMATO A4 ISO 216
			FECHA
			NOMBRE
			PROYECT.
			COMPROB.
			APROB.

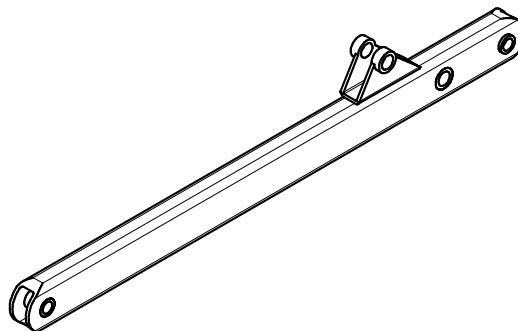
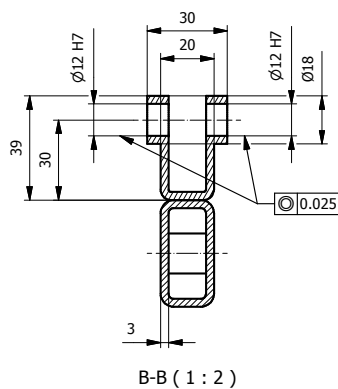
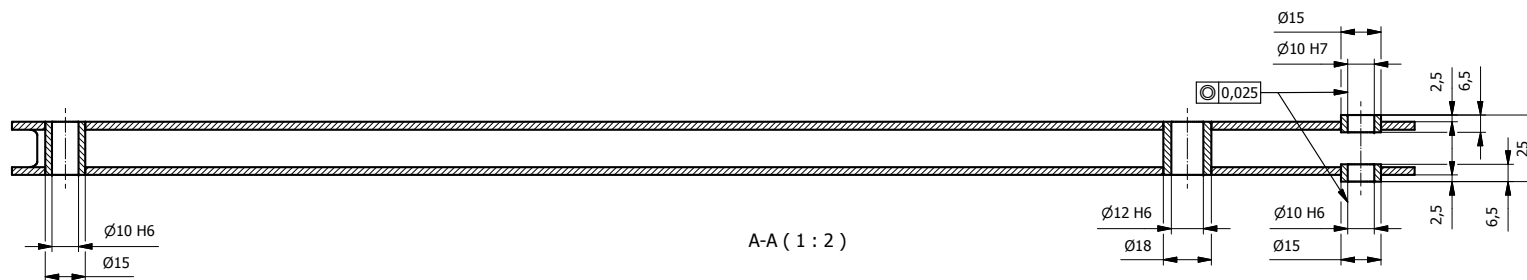
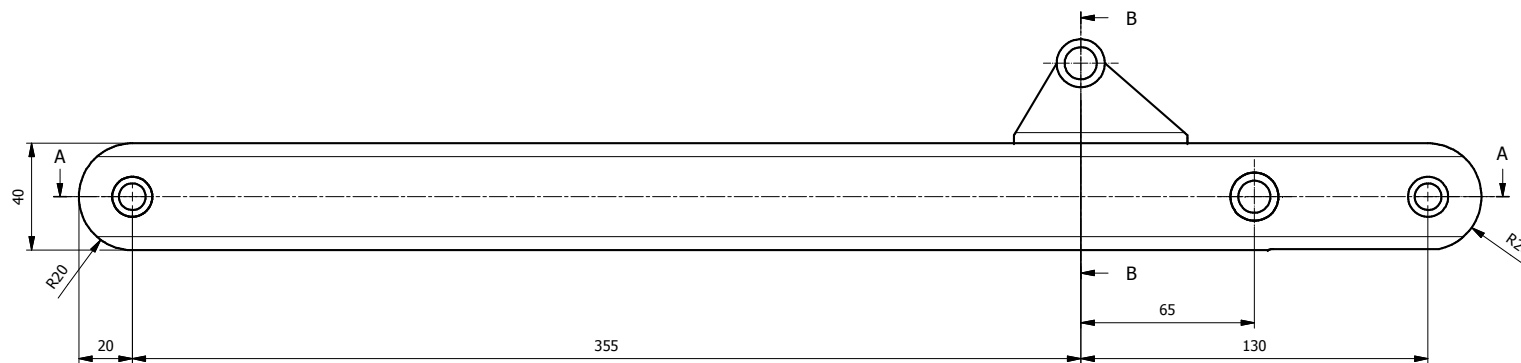
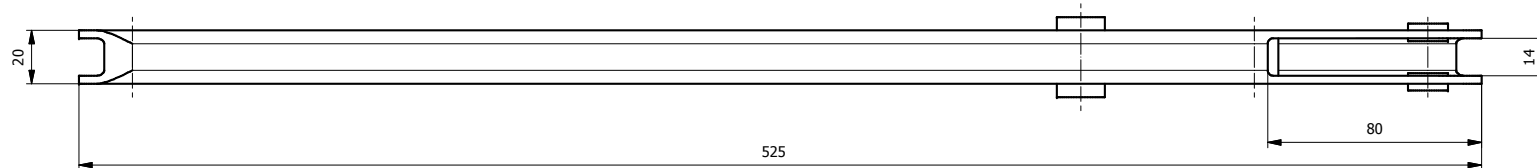
REFERENCIA	P0012
DENOMINACIÓN	BULÓN
SUST. A:	SUST. POR:
HOJA	1 / 1

Universidad Carlos III de Madrid

P0012

BULÓN

REV. 00



REV.	MODIF.	FECHA	ESCALA	FORMATO	REFERENCIA			REV.
			1 : 2	A3	P0013			00
				ISO 216	VIGA			1 / 1
					SUST. A:			
					SUST. POR:			
					HOJA			
					1 / 1			

ACABADO SUP.	6,4 / (1,6)	UNE 1-037	PESO
MATERIAL	AL 2030		0.456 kg
TRAT. TÉRM.			EN 573-3
DUREZA			ARISTAS
TRAT. SUP.	PINTADO RAL 1003		R=0,2 R=0,2 ISO 13715

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	


Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

Tolerancia general: ISO 2768-mk		FECHA		NOMBRE	
PROYECT.		05/04/13		JMG	
COMPROB.		05/04/13		JMG	
APROB.		05/04/13		JMG	

	Universidad Carlos III de Madrid
REFERENCIA	P0013